

**LUIDI FILIPE OLIVEIRA CRUZ DIAS**

**METODOLOGIA DE ATERRAMENTO PARA SUBESTAÇÃO UTILIZANDO O  
SOFTWARE TECAT PLUS 6.3**

**Brasília**

**2018**

**LUIDI FILIPE OLIVEIRA CRUZ DIAS**

**METODOLOGIA DE ATERRAMENTO PARA SUBESTAÇÃO UTILIZANDO O  
SOFTWARE TECAT PLUS 6.3**

Monografia apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) como pré-requisito para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação (Elétrica). Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação (Eletricista), e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS.

**Brasília**  
**2018**

**LUIDI FILIPE OLIVEIRA CRUZ DIAS**

**METODOLOGIA DE ATERRAMENTO PARA SUBESTAÇÃO UTILIZANDO O  
SOFTWARE TECAT PLUS 6.3**

**(TERMO DE APROVAÇÃO)**

Monografia apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) como pré-requisito para a obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação (Elétrica). Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro de Computação (Eletricista), e aprovado em sua forma final pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS.

**Brasília, 10 de Dezembro de 2018.**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Luciano Henrique Duque, Me.

---

Prof. Alcinéia Aguiar, Me.

---

Prof. Nilo Ribeiro, Me.

*O aterramento elétrico não é apenas um item normativo, mas é a engenharia elétrica  
a favor da vida.*

*Luidi Filipe Oliveira Cruz Dias*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, Aquele que é que era e que há de vir, toda honra e glória seja dada a Ele.

À memória de minha mãe Celeni Oliveira Cruz, exemplo de mulher pela luta e empenho na minha educação. Mesmo sendo mãe solteira e pobre, abdicou de muitos sonhos para me proporcionar o melhor, permitindo que concluísse a graduação.

.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado à oportunidade de cursar engenharia elétrica em uma das melhores universidades de Brasília. Por me sustentar nessa caminhada, pois se cheguei até aqui foi pela Sua permissão e ajuda.

À minha tia Eli Oliveira Cruz pelo apoio, paciência e cuidado ao longo desses sete anos que convivemos juntos, desde o falecimento da minha mãe. Seu companheirismo jamais será esquecido.

À minha namorada Kathleen Maira, pela compreensão e força que me deu nesses últimos meses. Em meio às adversidades, sua presença me trazia paz e certeza que tudo daria certo.

À toda minha família e amigos pelas orações e intercessões nos últimos anos. Essa diplomação reflete uma superação não apenas minha, mas de todos nós, um símbolo de vitória através da educação.

Aos meus pais na fé Vanderson Araújo, Alessandra Araújo e toda sua família. Abraçaram-me nos momentos difíceis dessa jornada, vocês demonstraram para mim o poder da amizade.

Ao meu orientador Prof. Luciano Henrique Duque juntamente com a IPT Engenharia pelo suporte concedido, não somente com os materiais e equipamentos, mas pela dedicação e atenção neste trabalho.

Ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) e professores, que contribuíram ao longo desses cinco anos para minha formação profissional.

Aos colegas Patrick Moreira, Felipe Bueno, Matheus Maia, Raul Oliveira, Victor Hugo e demais alunos da turma, sucesso e prosperidade a todos.

E a todas as dificuldades financeiras, emocionais e espirituais enfrentadas até aqui, pois elas são as pedras que tem construído este sonho.

## RESUMO

O aterramento é um procedimento de segurança estabelecido por diversas normas brasileiras e internacionais, aplicado a todos os níveis de tensão. A prática correta proporciona segurança as pessoas e equipamentos integrantes ou não da instalação, evitando perdas humanas e econômicas. Este trabalho apresenta uma metodologia de aterramento aplicada a uma subestação de média tensão, realizando uma comparação da influência do solo na determinação da resistência e potenciais de malha. Proposto dois locais com resistividades diferentes no Distrito Federal. O primeiro sendo um jardim no Senado Federal e o segundo uma área ociosa na Samambaia. Foram medidas as resistências do solo com um terrômetro, através do método de Wenner. Os terrenos foram estratificados em 4 camadas, utilizado o TecAT Plus 6.3, *software* especializado no dimensionamento de aterramento. Simulado dois arranjos distintos, o solo do Senado Federal apresentou baixa resistividade, consequentemente teve menor resistência de malha e potenciais, devido a sua estrutura mineral. Para a Samambaia foi simulado tratamento químico e físico, resultando na redução dos parâmetros analisados. Destarte que a comparação entre os dois terrenos, demonstra que o solo tem impacto direto no aterramento e que o superdimensionamento da malha aumenta o custo e diminui sua eficiência.

**Palavras-chaves:** Engenharia elétrica. Aterramento. Resistividade. Terreno. Solo. Subestação. Malha de terra. Resistencia de malha. Potencial de malha. Potencial de passo. Potencial de toque. TecAT Plus 6.3.

## ABSTRACT

Grounding is a safety procedure established by various Brazilian and international standards, applied to all voltage levels. The correct practice provides safety to people and equipment, whether or not they are part of the installation, avoiding human and economic losses. This work presents a grounding methodology applied to a medium voltage substation, making a comparison of the influence of the soil in the determination of resistance and mesh potentials. I propose two sites with different resistivities in the Federal District. The first being a garden in the Federal Senate and the second an idle area in the Fern. The soil resistance with a terrometer was measured using the Wenner method. The terrains were laminated in 4 layers, using the TecAT Plus 6.3, software that specializes in the sizing of ground. Simulated two distinct arrangements, the soil of the Federal Senate presented low resistivity, consequently had lower mesh strength and potentials due to its mineral structure. Samambaia was simulated chemical and physical treatment, resulting in the reduction of the analyzed parameters. Thus, the comparison between the two plots shows that the soil has a direct impact on the ground and that the oversizing of the mesh increases the cost and decreases its efficiency.

**Keywords:** Electrical engineering. Grounding. Resistivity. ground. Ground. Substation. Earth's mesh. Mesh strength. Mesh potential. Potential of step. Touch potential. TecAT Plus 6.3.



## SUMÁRIO

<b>1 ... INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Delimitação do Tema .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2 Problematização .....</b>	<b>19</b>
<b>1.3 Objetivo.....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>1.4 Motivação .....</b>	<b>21</b>
<b>1.5 Trabalhos Correlatos .....</b>	<b>21</b>
<b>1.6 Procedimentos Metodológicos .....</b>	<b>22</b>
<b>1.7 Resultados Esperados .....</b>	<b>24</b>
<b>2 .... REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Subestações de Energia Elétrica.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.1 Características gerais.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.2 Nível de Tensão.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1.3 Função no Sistema Elétrico .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1.4 Modo de Instalação.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.5 Modelo da subestação que será dimensionado a malha de aterramento .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Conceitos sobre aterramento elétrico.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.1 Aterramento de sistema .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.2 Sistema de aterramento .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3 Componentes da malha de aterramento.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3.1 Haste de aterramento.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3.2 Condutor de aterramento .....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.3.3 Conexões de aterramento.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.3.4 Condutor de proteção.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.4 Resistividade do solo .....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.5 Resistência de aterramento .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3 Medição da resistividade.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.1 Medição por amostragem .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.2 Medição local .....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.3 Método de Wenner.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.3.1 Medição pelo método de Wenner .....</b>	<b>45</b>
<b>2.3.3.2 Direções a serem medidas.....</b>	<b>46</b>
<b>2.3.3.3 Análise das medidas .....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.3.4 Cuidados na Medição.....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.4 Estratificação do solo.....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.4.1 Método simplificado para estratificação do solo em duas camadas.....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.4.2 Resistividade aparente.....</b>	<b>51</b>
<b>2.3.4.3 Cálculo da resistividade aparente do solo pelo método simplificado em duas camadas.....</b>	<b>51</b>
<b>2.4 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano .....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.1 Choque elétrico.....</b>	<b>53</b>
<b>2.4.2 Fibrilação ventricular do coração provocados pelo choque elétrico...</b>	<b>53</b>
<b>2.4.3 Limite de corrente suportável.....</b>	<b>54</b>

2.5	Potenciais na superfície do solo .....	54
2.5.1	<i>Potencial de passo .....</i>	<i>54</i>
2.5.2	<i>Potencial de toque máximo .....</i>	<i>55</i>
2.6	Dimensionamento de malha de aterramento para subestação .....	56
2.7	Tratamento do solo.....	64
2.7.1	<i>Tratamento químico.....</i>	<i>65</i>
2.7.2	<i>Tratamento físico do solo através da utilização da fundação no projeto de aterramento .....</i>	<i>67</i>
3 ....	<b>MEDIÇÕES EM CAMPO E PROCEDIMENTOS .....</b>	<b>69</b>
3.1	Característica do solo na região do Distrito Federal .....	69
3.2	Locais de Medição .....	70
3.2.1	<i>Terreno 1: Senado Federal.....</i>	<i>71</i>
3.2.2	<i>Terreno 2: Samambaia: .....</i>	<i>72</i>
3.3	Instrumentação de medição.....	73
3.4	Processo de medição em campo .....	75
3.4.1	<i>Determinação da resistência do solo.....</i>	<i>75</i>
3.4.2	<i>Determinação dos eixos de medição .....</i>	<i>76</i>
3.4.3	<i>Determinação dos espaçamentos .....</i>	<i>76</i>
3.5	Resultados obtidos.....	78
3.5.1	<i>Medição terreno 1: Senado Federal .....</i>	<i>78</i>
3.5.2	<i>Medição terreno 2- Samambaia .....</i>	<i>79</i>
3.6	Apresentação do Software TecAt Plus .....	80
3.6.1	<i>História do TecAt Plus.....</i>	<i>81</i>
3.6.2	<i>Características Gerais .....</i>	<i>81</i>
3.6.3	<i>Ferramentas no TecAt Plus 6.3 para dimensionamento da malha de terra para subestação.....</i>	<i>82</i>
3.7	Metodologia aplicada para dimensionamento da malha no TecAt Plus 6.3.....	89
4 ....	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>93</b>
4.1	Resistência apresentada pelos terrenos .....	93
4.2	Determinação da resistividade .....	95
4.2.1	<i>Estratificação do terreno 1: Senado Federal.....</i>	<i>95</i>
4.2.2	<i>Estratificação do terreno 2: Samambaia.....</i>	<i>97</i>
4.2.3	<i>Avaliação das resistividades determinadas .....</i>	<i>100</i>
4.3	Dimensionamento da malha de terra .....	100
4.3.1	<i>Arranjo de malha A .....</i>	<i>100</i>
4.3.2	<i>Arranjo de malha B .....</i>	<i>102</i>
4.4	Aplicação dos arranjos propostos .....	104
4.4.1	<i>Arranjo A para terreno no Senado Federal.....</i>	<i>104</i>
4.4.2	<i>Arranjo B para terreno no Senado Federal.....</i>	<i>106</i>
4.4.3	<i>Arranjo A para terreno na Samambaia.....</i>	<i>107</i>
4.4.4	<i>Arranjo B para terreno na Samambaia.....</i>	<i>109</i>
4.4.5	<i>Avaliação dos arranjos aplicados .....</i>	<i>110</i>
4.5	Tratamento químico do solo no terreno da Samambaia .....	113
4.5.1	<i>Redução de 25% da resistividade .....</i>	<i>115</i>
4.5.2	<i>Redução de 50% da resistividade .....</i>	<i>117</i>

4.5.3	<i>Redução de 75% da resistividade</i>	119
4.6	Tratamento físico do solo no terreno da Samambaia	121
4.6.1	<i>Fundação apresentando 90 <math>\Omega.m</math></i>	122
4.6.2	<i>Fundação apresentando 60 <math>\Omega.m</math></i>	122
4.6.3	<i>Fundação apresentando 30 <math>\Omega.m</math></i>	122
4.7	Avaliação dos tratamentos propostos	124
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
5.1	Conclusões	125
5.2	Proposta de Trabalhos Futuros	127
	REFERÊNCIAS	128
	APÊNDICES	131
	Apêndice A – Método simplificado de estratificação em duas camadas	131
	Apêndice B – Dimensionamento de uma malha de aterramento para subestação de média tensão	132
	Apêndice C – Fotos do 1º terreno: Senado Federal	133
	Apêndice D – Fotos do 2º terreno: Samambaia	134
	Apêndice E – Equipamentos e ferramentas utilizados na medição	135
	Apêndice F – Procedimento para determinação da resistência do solo	136
	Apêndice G – Processos de simulação no TecAt Plus 6	137
	Apêndice H – Resistência de malha para o 1º terreno: Senado Federal	138
	Apêndice I – Potenciais admissíveis para o 1º terreno: Senado Federal	138
	Apêndice J – Resistência de malha para o 2º terreno: Samambaia	139
	Apêndice K – Potenciais admissíveis para o 2º terreno: Samambaia	140
	ANEXOS	141
	Anexo A – Planta da subestação: Vista frontal	141
	Anexo B – Planta da subestação: Vista superior	142
	Anexo C – Tabela para cálculo do parâmetro $K_1$	143
	Anexo D – Determinação da resistividade aparente a partir do fator $K_3$	144
	Anexo E – Características dos condutores de aço cobreado	145
	Anexo F – Localização do 1º terreno: Senado Federal	146
	Anexo G – Localização do 2º terreno: Samambaia	146
	Anexo H – Orçamento para materiais que compõe o arranjo A	147
	Anexo I – Orçamento máquina perfuratriz	148
	Anexo J – Orçamento para materiais que compõe o arranjo B	149

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 Constituição básica do aterramento.....	17
Figura 1. 2 Modelo de solo estratificado.....	18
Figura 1. 3 Potenciais na superfície do solo.....	19
Figura 1. 4 Diagrama do Projeto .....	23
Figura 2. 1 Principais equipamentos que compõe uma subestação comercial. ....	26
Figura 2. 2 Níveis de tensão regulamentados conforme o art. 1º do Decreto nº 97.280, de 16 de dezembro de 1988.....	26
Figura 2. 3 Classificação das subestações no SEP com respectivas funções. ....	27
Figura 2. 4 Subestação Externa ou Ao Tempo Brasília Sul, localizada em Brasília (DF). ....	28
Figura 2. 5 Subestação Abrigada em Alvenaria. ....	29
Figura 2. 6 Subestação Abrigada em Invólucro Metálico. ....	29
Figura 2. 7 Subestação modelo.....	30
Figura 2. 8 Componente de um sistema de aterramento. ....	32
Figura 2. 9 Modelos de haste de aterramento.....	33
Figura 2. 10 Tipos de conectores para malha de aterramento. ....	34
Figura 2. 11 Modelo de cubo unitário para medição de resistividade.....	35
Figura 2. 12 Efeito da umidade na resistividade do solo. ....	37
Figura 2. 13 Comportamento da resistividade em relação a temperatura. ....	38
Figura 2. 14 Efeito do tipo e concentração de sais na resistividade de solo. ....	39
Figura 2. 15 Resistências de um sistema de aterramento. ....	41
Figura 2. 16 Medição da resistividade em laboratório. ....	42
Figura 2. 17 Arranjo de Wenner. ....	43
Figura 2. 18 Imagens dos pontos 1 e 4 do arranjo de Wenner.....	43
Figura 2. 19 Penetração da corrente nas hastes pelo solo. ....	45
Figura 2. 20 Ligação do Megger aos eletrodos de medida de resistividade no solo. ....	45
Figura 2. 21 Croquis para medição da resistividade. ....	47
Figura 2. 22 Exemplo de estratificação do solo.....	49
Figura 2. 23 Curvas $\rho(a) \times a$ para solo e duas camadas.....	50
Figura 2. 24 Exemplo de gráfico $\rho(a) \times a$ . ....	50
Figura 2. 25 Potencial de passo.....	55
Figura 2. 26 Potencial de toque.....	56
Figura 2. 27 Geometria da malha de terra com os respectivos eletrodos verticais. ....	59
Figura 2. 28 Resistência de terra reduzida pelo tratamento químico. ....	66
Figura 2. 29 Variação da resistência de terra em solos tratados e não tratados, com o tempo. ....	66
Figura 2. 30 Procedimentos para tratamento químico do solo. ....	67
Figura 3. 1 Mapa do solo no Distrito Federal.....	70
Figura 3. 2 Primeiro Terreno: Senado Federal. ....	71
Figura 3. 3 Segundo terreno: Samambaia.....	72
Figura 3. 4 Instrumento e ferramentas para medição.....	73
Figura 3. 5 Bornes conforme arranjo de Wenner no terrômetro digital MTD 20 KWe. .....	74
Figura 3. 6 Croqui dos eixos utilizados para medição das resistências no Senado Federal. ....	77
Figura 3. 7 Croqui dos eixos utilizados para medição das resistências na Samambaia. ....	77

Figura 3. 8 Croqui dos espaçamentos utilizados para medição das resistências.....	78
Figura 3. 9 Menu de ferramentas do TecAt Plus 6.3. ....	82
Figura 3. 10 Passo 2 - Resistividade no TecAT Plus 6.3. ....	83
Figura 3. 11 Limite de desvio ponto um ponto.....	84
Figura 3. 12 Passo 3 - Malha 2 no TecAT Plus 6.3. ....	87
Figura 3. 13 Passo 5 - Potenciais no TecAT Plus 6.3. ....	89
Figura 3. 14 Dados e configurações utilizados no TecAT Plus 6.3. ....	90
Figura 3. 15 Parâmetros para cálculo de potenciais. ....	92
Figura 4. 1 Medidas referentes ao terreno do Senado Federal no TecAT Plus 6.3....	95
Figura 4. 2 Relatório de estratificação no terreno do Senado Federal. ....	96
Figura 4. 3 Diagrama do terreno para estratificação no Senado Federal. ....	96
Figura 4. 4 Gráfico da resistividade para o terreno no Senado Federal. ....	97
Figura 4. 5 Medidas referentes ao terreno da Samambaia no TecAT Plus 6.3. ....	97
Figura 4. 6 Relatório de estratificação no terreno da Samambaia.....	98
Figura 4. 7 Diagrama do terreno para estratificação na Samambaia. ....	99
Figura 4. 8 Gráfico da resistividade para o terreno na Samambaia. ....	99
Figura 4. 9 Arranjo da malha A.....	101
Figura 4. 10 Materiais referentes ao arranjo A. ....	101
Figura 4. 11 Arranjo da malha B.....	103
Figura 4. 12 Materiais referentes ao arranjo B. ....	103
Figura 4. 13 Potencial de toque para arranjo A aplicado ao terreno do Senado Federal. ....	105
Figura 4. 14 Potencial de passo para arranjo A aplicado ao terreno do Senado Federal. ....	105
Figura 4. 15 Potencial de toque para arranjo B aplicado ao terreno do Senado Federal. ....	106
Figura 4. 16 Potencial de passo para arranjo B aplicado o ao terreno do Senado Federal. ....	107
Figura 4. 17 Potencial de toque para arranjo A aplicado ao terreno da Samambaia. .....	108
Figura 4. 18 Potencial de passo para arranjo A aplicado ao terreno da Samambaia. .....	108
Figura 4. 19 Potencial de toque para arranjo B aplicado ao terreno da Samambaia. .....	109
Figura 4. 20 Potencial de passo para arranjo B aplicado ao terreno da Samambaia. .....	110
Figura 4. 21 Resistencia de terra dos eletrodos. ....	111
Figura 4. 22 Potencial de malha para arranjo A aplicado ao terreno da Samambaia. .....	112
Figura 4. 23 Potencial de malha para arranjo B aplicado ao terreno da Samambaia. .....	112
Figura 4. 24 Comparação entre a aplicação do gel x bentonita. ....	113
Figura 4. 25 Potencial de toque no terreno da Samambaia com redução de 25%..	116
Figura 4. 26 Potencial de passo no terreno da Samambaia com redução de 25%.	117
Figura 4. 27 Potencial de toque no terreno da Samambaia com redução de 50%..	118
Figura 4. 28 Potencial de passo no terreno da Samambaia com redução de 50%.	118
Figura 4. 29 Potencial de toque no terreno da Samambaia com redução de 75%..	120
Figura 4. 30 Potencial de passo no terreno da Samambaia com redução de 75%.	120
Figura 4. 31 Confragem da fundação para construção de subestação. ....	121
Figura 4. 32 Croqui da fundação referente a subestação. ....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. 1 Perdas totais nas redes do Brasil. ....	15
Tabela 2. 1 Resistividade para diversos tipos de solo. ....	36
Tabela 2. 2 Resistividade conforme o nível de umidade do solo. ....	37
Tabela 2. 3 Efeito da temperatura na resistividade do solo. ....	38
Tabela 2. 4 Influência da concentração de sais na resistividade do solo. ....	39
Tabela 2. 5 Número mínimo de linhas de medição para dimensões do terreno. ....	46
Tabela 2. 6 Espaçamentos recomendados. ....	47
Tabela 2. 7 Seção mínima do condutor de acordo com seu material. ....	57
Tabela 2. 8 Seção mínima do condutor $\text{mm}^2/\text{A}$ . ....	58
Tabela 3. 1 Dados climáticos durante a semana de medição no terreno do Senado Federal. ....	79
Tabela 3. 2 Valores de resistência no terreno do Senado Federal. ....	79
Tabela 3. 3 Dados climáticos durante a semana de medição no terreno da Samambaia. ....	80
Tabela 3. 4 Valores de resistência no terreno da Samambaia. ....	80
Tabela 3. 5 Arranjos propostos para dimensionamento da malha de terra. ....	91
Tabela 4. 1 Discrepância apresentada entre as camadas dos terrenos analisados. ....	100
Tabela 4. 2 Previsão de custos para instalação da malha de terra no arranjo A. ....	102
Tabela 4. 3 Previsão de custos para instalação da malha de terra no arranjo B. ....	104
Tabela 4. 4 Previsão de custos para instalação da malha de terra com tratamento do solo no arranjo A. ....	115
Tabela 4. 5 Previsão de custos para instalação da malha de terra com tratamento do solo no arranjo B. ....	115
Tabela 4. 6 Valores de resistência no terreno da Samambaia com redução de 25%. ....	116
Tabela 4. 7 Valores de resistência no terreno da Samambaia com redução de 50%. ....	117
Tabela 4. 8 Valores de resistência no terreno da Samambaia com redução de 75%. ....	119
Tabela 4. 9 Dados referentes à estrutura de fundação da subestação. ....	123

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos cem anos, o mundo passou por modernização e automatização dos processos industriais, onde a energia elétrica assumiu papel de destaque na matriz de produção.

Obtida a partir de os outros tipos de energia, a eletricidade é capaz de produzir calor, trabalho mecânico e luz, sendo uma das fontes mais convenientes para estes fins. (CREDER, 2013)

Houve uma expansão das matrizes elétricas para suprir a demanda, com a criação de unidades geradoras em diversas localidades, tendo como plantas principais: térmica, hidráulica e nuclear. (GEBRAM, 2014)

A eletricidade chega aos consumidores por meio do Sistema Elétrico de Potência (SEP) compostos de quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo.

Nos últimos anos segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as perdas no Sistema Interligado Nacional (SIN) tem aumentado anualmente conforme aumenta a demanda, retratadas na Tabela 1.1. (EPE; 2017)

**Tabela 1. 1** Perdas totais nas redes do Brasil.

ANO	2012	2013	2014	2015	2016
SIN	17,2	16,9	17,5	18,5	19,3
Norte	17,6	21,5	25,7	28,5	28,2
Nordeste	19,8	18,8	18,4	18,9	19,9
Sudeste/Centro Oeste	17,4	16,6	17,3	18,1	19,2
Sul	14,0	13,9	13,7	14,4	14,9

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (EPE, 2017).

Dentre as perdas no SEP, podem ser consideradas as faltas elétricas. Caraterizadas como o contato entre partes com potenciais distintos, bem como uma

ou mais dessas partes com a terra. Ocasionalmente na maioria das vezes por falhas de isolamento. (COTRIM, 2009)

Descargas atmosféricas e fatores intervenientes no sistema, como a queda de uma árvore juntamente com sobretensões, sobrecorrentes e sobrecargas, provocam perdas econômicas e humanas.

No cenário atual as subestações são imprescindíveis para a distribuição e alimentação de consumidores industriais e comerciais. Sendo um dos componentes do SEP que mais são afetados durante as faltas elétricas, por possuírem equipamentos dispendiosos.

Visando evitar ou mitigar os efeitos decorrentes das faltas elétricas no sistema, utiliza-se o processo de aterramento. O Brasil é um país em que sua prática é tratada displicentemente.

O órgão responsável pela normalização do assunto no país é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que possui diversas regulamentações referentes a técnica de aterramento, entre elas:

- NBR 14039 de 2005: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 a 36,2 kV.
- NBR 7117 de 2012: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.
- NBR 15751 de 2013: Sistemas de aterramento de subestações.

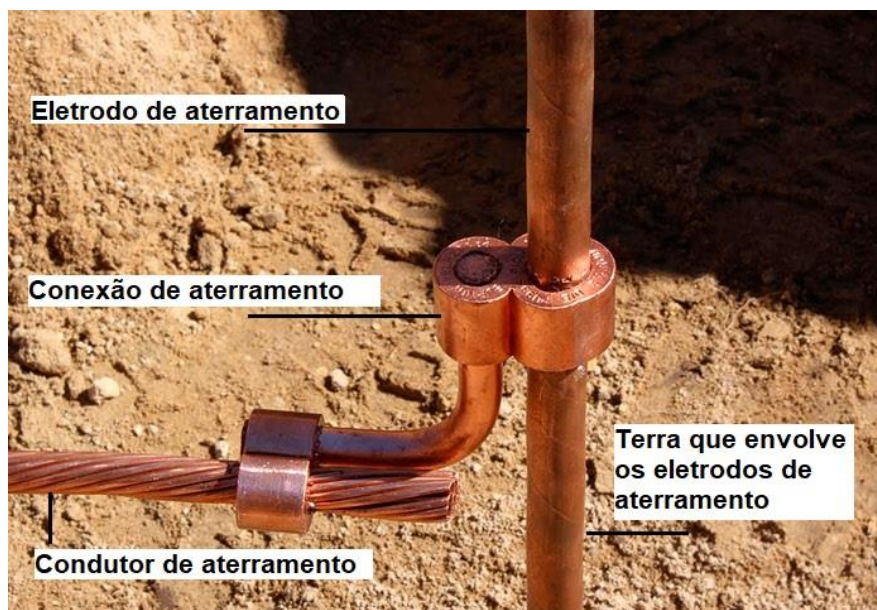
Para (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995) a prática do aterramento assegura condições para o bom funcionamento do sistema elétrico, garantindo proteção dos equipamentos e pessoas dentro das instalações. A Figura 1.1 apresenta a constituição do aterramento.

*Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Este se constitui basicamente de três componentes:*

- *as conexões elétricas que interligam um ponto do sistema aos eletrodos;*
- *eletrodo de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo);*
- *terra que envolve os eletrodos. (VISACRO FILHO, 2002)*



**Figura 1. 1** Constituição básica do aterramento.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MARIDO, 2018).

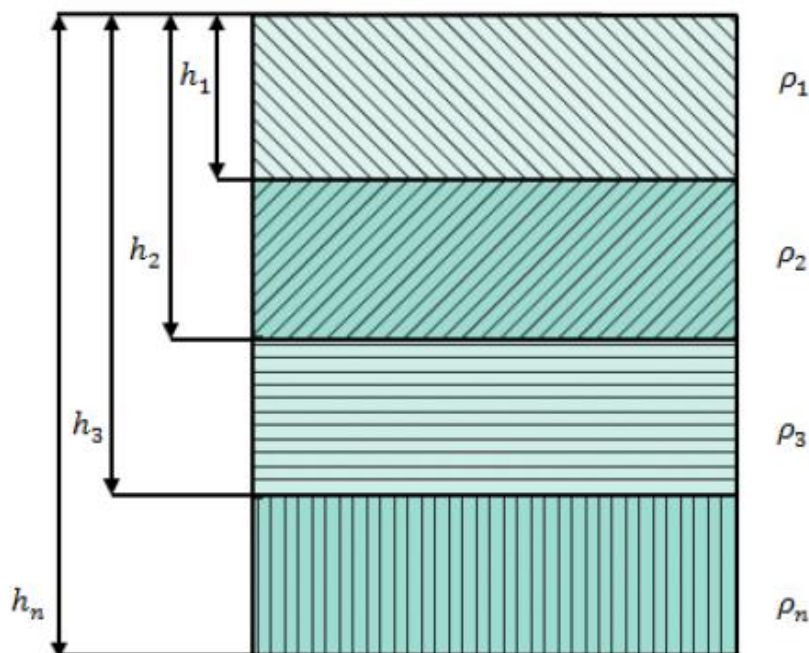
É primordial o conhecimento prévio das características do solo, principalmente sua resistividade. Diversos fatores influenciam a resistividade do terreno, como características minerais, condições climáticas e fatores externos. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Devido a não linearidade e falta de homogeneização dos solos, a estratificação é um recurso utilizado para aferir as diferentes resistividades apresentadas ao longo das camadas estratificadas, ilustrado na Figura 1.2.

Para cálculos da resistividade utiliza-se o terrômetro aplicado no método de Wenner. O arranjo é o mais empregado no dimensionamento de sistemas de aterramentos. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Os dados coletados são fundamentais para a geometria do sistema de aterramento, possibilitando determinar os parâmetros de risco da subestação e garantir segurança ao projeto.

**Figura 1. 2** Modelo de solo estratificado.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MAMEDE FILHO, 2017).

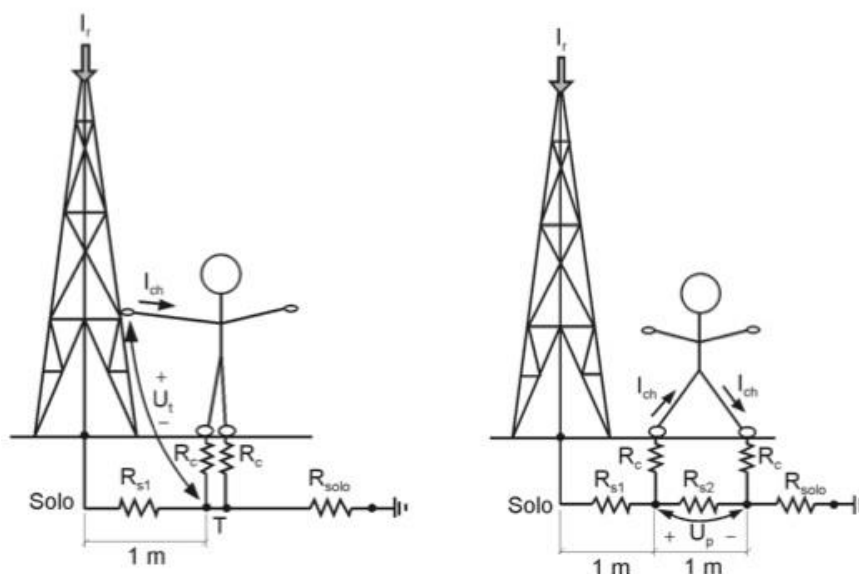
Quando partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, resulta em uma corrente elétrica que percorrerá o corpo do indivíduo, comprometendo sua integridade fisiológica.

*Qualquer atividade biológica, seja ela glandular, nervosa seja muscular, é estimulada ou controlada por impulsos de corrente elétrica. Se essa corrente fisiológica intensa se somar a outra corrente de origem externa, devido a um contato elétrico, ocorrerá uma alteração das funções vitais normais no organismo humano, que pode levar o indivíduo à morte, dependendo da duração da corrente. (COTRIM, 2009)*

O descaso com a prática do aterramento, pode ocasionar danos fatais aos usuários das instalações elétricas, sendo necessário atenção para os parâmetros de risco, como tensão de passo e tensão de toque.

De acordo com a (ABNT, 2013) tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo, separados pela distância horizontal de 1 metro. Já a tensão de toque é a diferença entre o objeto energizado, aterrado ou não, e um ponto separado por uma distância horizontal de 1 metro. A Figura 1.3 ilustra o potencial de passo (direita) e potencial toque (esquerda).

**Figura 1. 3** Potenciais na superfície do solo.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (IEEE; 2000).

## 1.1 Delimitação do Tema

Este trabalho visa apresentar um comparativo entre duas malhas de aterramento para uma subestação comercial, baseado nas configurações de dois terrenos com características de solo distintas. De modo, a garantir a segurança dos equipamentos pertencentes a subestação e usuários da instalação.

Serão realizadas medições nestes terrenos com a utilização de terrômetro, para avaliar suas respectivas resistividades, analisando as informações coletadas por meio de um *software* de aterramento.

Baseado nos resultados do *software*, será verificado as diferenças resultantes devido ao solo de cada terreno. Em seguida será proposto o melhor arranjo para a malha de aterramento nos locais analisados.

## 1.2 Problematização

É comum no Brasil ocorrer o superdimensionamento de materiais para execução de obras, acarretando maior custo e tempo para finalização do projeto. Tal prática intercorre na área de aterramento.

Dependendo do local em que será instalado, o valor do serviço chega a ser inviável, com baixa eficiência e qualidade contestável na redução dos parâmetros de segurança.

Para engenheiros eletricitas é necessário o conhecimento do tipo de solo que será instalado o aterramento, para que o projeto garanta maior viabilidade técnica e econômica.

Diante desse panorama, o trabalho apresentará a influência do terreno no dimensionamento de malhas de aterramento para subestação de média tensão. A partir da estratificação do solo, será comparado dois locais e o tipo de arranjo, proposto através da análise no *software*.

### **1.3 Objetivo**

A seguir é descrito o objetivo geral e objetivos específicos, para este trabalho, de conclusão de curso em engenharia elétrica.

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

Projetar malha de aterramento para uma subestação comercial, através da utilização do *software* de aterramento TecAt Plus 6.3, verificando a influência do solo no dimensionamento da malha.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Levantar a bibliografia sobre o tema abordado no trabalho.
- Apontar o projeto de uma subestação comercial.
- Definir os conceitos sobre aterramento elétrico.
- Definir os dois terrenos onde serão realizadas as medições e o dimensionamento do aterramento.
- Definir os métodos de medição da resistência do solo.
- Demonstrar o funcionamento do *software* TecAt Plus 6.3.
- Realizar as medições em campo com a instrumentação específica para aterramento elétrico.
- Propor mais de um arranjo para aplicação nos terrenos sugeridos.

- Projetar malhas de aterramento para cada terreno analisado.
- Analisar os dados e resultados encontrados nas situações propostas.
- Conclusões e comentários sobre o experimento e projeto realizado.

#### **1.4 Motivação**

No decorrer da graduação em engenharia elétrica pelo Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), através de conversas com discentes, docentes e profissionais da área, observei o déficit de profissionais e materiais específicos, que abordem o assunto de aterramento e suas aplicações.

Concernente ao tema e apreço pela área de potência, decidi dissertar sobre aterramento aplicado a subestação, visando adquirir conhecimento para atuação profissional e embasamento teórico e prático para iniciar a tese de mestrado no mesmo âmbito.

Baseado nas necessidades de fornecimento ininterrupto e qualidade de energia na entrega da eletricidade através das subestações comerciais, que garantam confiabilidade e segurança, é necessário o correto aterramento das instalações e equipamentos.

Destarte que este trabalho, se propõe a analisar a partir de dois terrenos as influências das características do solo, para a instalação de uma malha de aterramento, demonstrando os impactos que as configurações do local causam no projeto.

#### **1.5 Trabalhos Correlatos**

Rodrigo Kalid Mansur (2014) projeto de diplomação, teve como objetivo confeccionar um material didático para ser utilizado pelos alunos de graduação, de forma a suprir uma lacuna de conhecimento sobre o tema “medições de resistência e resistividade de aterramento”.

Welton Silva de Oliveira (2018) demonstrou o planejamento de um aterramento elétrico, considerando a redução da resistência de aterramento encontrada por meio da configuração de eletrodos.

Nathalia Salomão Damião (2018) desenvolveu um estudo de caso para uma subestação, avaliando as tensões superficiais do solo escolhido e ajustando as medidas de acordo com as normas vigentes.

Este trabalho se propõe a analisar o aterramento para subestação de média tensão, em função do terreno instalado. Considerando os meios externos de influência sobre o solo, apresentando gráficos sobre o comportamento dos parâmetros de aterramentos nos locais determinados, apontando a interferência do solo no dimensionamento do projeto.

## **1.6 Procedimentos Metodológicos**

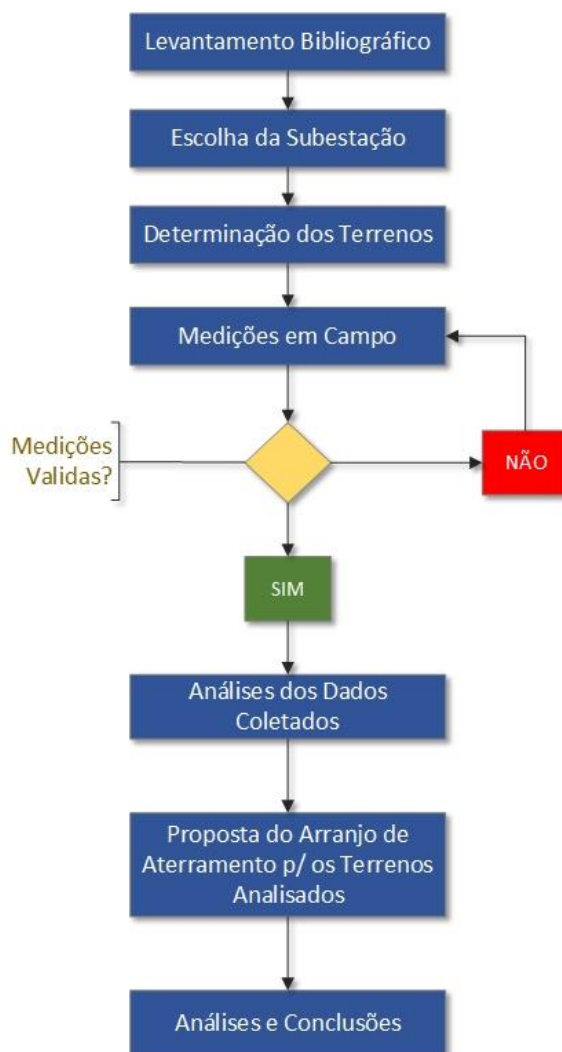
O trabalho foi estruturado a partir de pesquisas a livros que tratem sobre aterramento, estratificação do solo e sistemas de potência, empregando a pesquisa, trabalhos de conclusão de curso, artigos e notas técnicas.

As pesquisas foram realizadas nos materiais disponíveis na Biblioteca Reitor João Herculino, acervo acadêmico do UniCEUB, biblioteca de outras instituições e investigação de bibliografia com discentes, docentes e especialistas da área.

Foi utilizado como recursos adicionais pesquisas de instituições e órgãos conceituados, matérias técnicas, sites especializados na área elétrica e outros conteúdos de valia para a composição da pesquisa. As informações encontradas através da internet serão averiguadas e mencionadas no Referencial Teórico.

A esquematização e desenvolvimento do projeto está sintetizada na Figura 1.4:

**Figura 1. 4** Diagrama do Projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Etapa 1. Levantamento Teórico:** Será utilizado livros que tratem sobre o assunto e bibliografias na área elétrica. Artigos escrito por profissionais e dissertações acadêmicas, além de pesquisas e materiais feitos por especialistas.

**Etapa 2. Ambientação do projeto:** Para aplicação da metodologia de aterramento no decorrer do trabalho, será utilizado um exemplo de subestação abrigada de 13,8 KV, classificada como média tensão conforme a NBR 14039 de 2005 (MAMEDE FILHO, 2017).

**Etapa 3. Determinação dos terrenos:** Foram escolhidos terrenos com configurações de solo distintas. O primeiro foi um jardim situado no Senado Federal. O segundo terreno é uma área ociosa localizada na Samambaia, região administrativa do Distrito Federal.

**Etapa 4. Medições em campo:** Será utilizado o terrômetro digital Megabras MTD 20KWe para realizar as medições em campo, sendo empregue o método de Wenner na aferição da resistividade.

**Etapa 5. Análise dos dados coletados:** Conforme valores de resistividade mensurados em campo, as informações serão copiladas para o *software* de aterramento TecAt Plus 6.3, onde os dados serão analisados sobre os locais a serem dimensionados os aterramentos.

**Etapa 6. Comparativo entre as malhas de aterramento e conclusões sobre a interferência do solo no projeto de aterramento:** Baseado nos resultados do TecAt Plus 6.3 será verificado as diferenças resultantes nos arranjos de aterramento, aplicado nos terrenos sugeridos. Concluindo o rendimento na metodologia proposta e analisando as interferências decorrentes das características do solo e números de hastes podem provocar na eficiência do aterramento.

## **1.7 Resultados Esperados**

Almeja-se com as medições e estratificações do solo nos dois terrenos sugeridos, que se obtenha um arranjo de aterramento com configurações mais simples para a subestação localizada no solo com características mais condutivas, que neste caso será o jardim no Senado Federal ao invés do terreno desocupado na Samambaia.

Espera-se que os dados gerados no TecAt Plus 6.3, através de planilhas e gráficos, com o mesmo arranjo aplicado no terreno com maior condutibilidade apresente menor resistência de terra, demonstrando a interferência do solo no dimensionamento do aterramento.

Conforme a (ABNT, 2013) será estabelecido um arranjo de aterramento que garanta condições de segurança, para pessoas e equipamentos dentro e fora dos limites da subestação comercial.



## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo apresentará os assuntos pertinentes a elaboração deste projeto, o que inclui conceitos sobre subestações, aterramento elétrico e métodos de medição de aterramento. A seguir, os materiais apresentados trazem respaldo teórico, para uma metodologia de aterramento de subestações de média tensão.

### **2.1 Subestações de Energia Elétrica**

Apesar das crises que assolaram o país nos últimos anos, a economia vem melhorando, refletindo sinais de crescimento. Propiciando expectativas para retomada produtiva e estabilização dos setores produtivos no Brasil. (ONS, 2018)

O fornecimento de energia elétrica se torna primordial para o progresso econômico, nesse contexto é necessário o entendimento das subestações, elementos do SEP responsáveis pelo abastecimento dos centros industriais e comerciais.

#### **2.1.1 Características gerais**

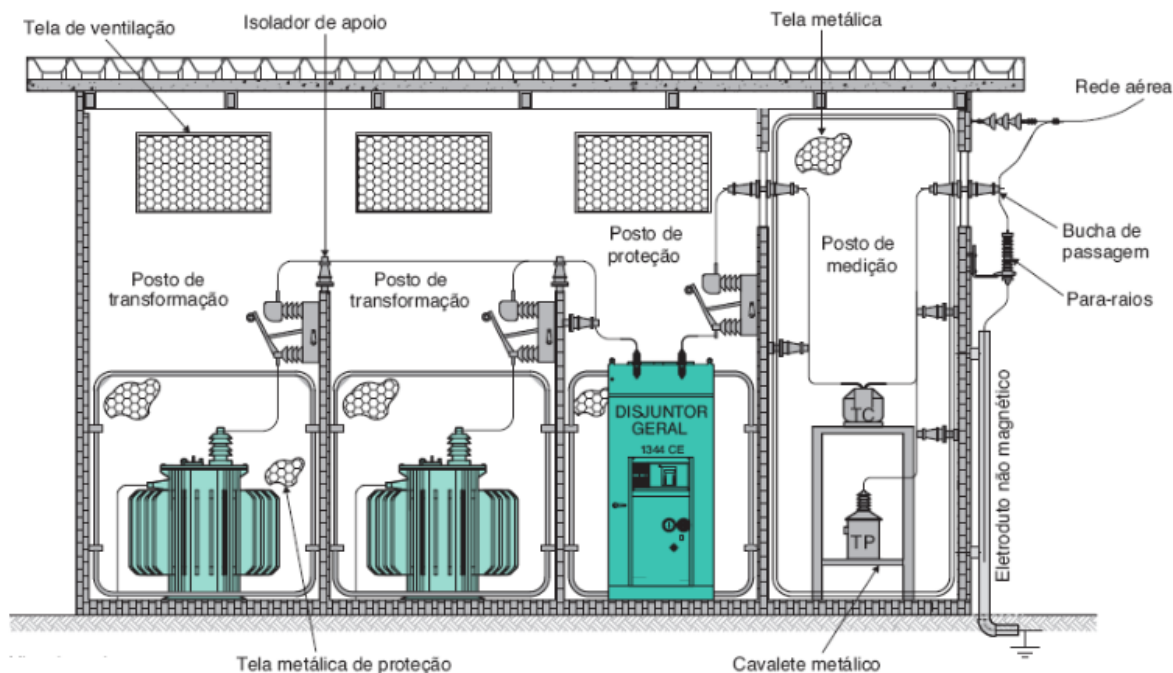
A energia elétrica gerada nas usinas e transportada pelas linhas de transmissão, são redistribuídas através das subestações, conjunto de equipamentos mecânicos, eletrônicos e elétricos que compõe o SEP.

Subestação é todo aglomerado de dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo a estrutura da edificação. (ABNT, 2013). Possuem o objetivo de modificar os níveis de tensão e corrente elétrica, possibilitando sua distribuição de acordo com a demanda do cliente.

Qualquer subestação é definida a partir das necessidades energéticas e do tipo de local a ser instalada. De maneira genérica, uma subestação apresenta os seguintes equipamentos: transformadores: Transformadores de corrente e de potência, autotransformador, disjuntor, chaves seccionadoras, para-raios, reatores, relés de proteção e isoladores, conforme a Figura 2.1. (MAMEDE FILHO, 2015)

Basicamente, as subestações são classificadas em relação ao seu nível de tensão, função no sistema elétrico de potência e modo de instalação.

**Figura 2. 1** Principais equipamentos que compõe uma subestação comercial.

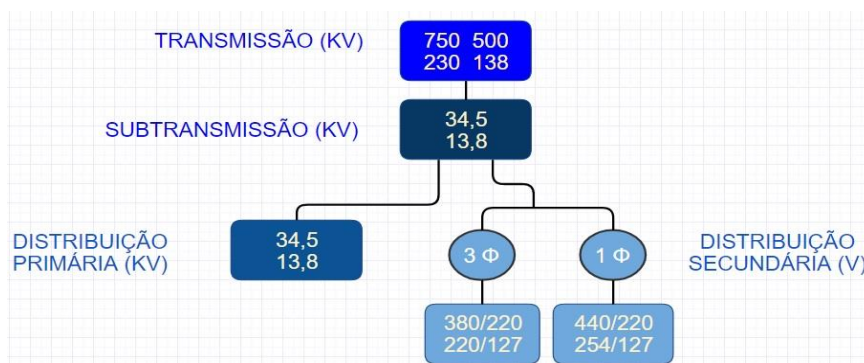


Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.

### 2.1.2 Nível de Tensão

O art. 1º do Decreto nº 97.280, de 16 de dezembro de 1988, define os níveis regulamentados para transmissão, subtransmissão, distribuição primária e distribuição secundária, consoante a Figura 2.2.

**Figura 2. 2** Níveis de tensão regulamentados conforme o art. 1º do Decreto nº 97.280, de 16 de dezembro de 1988.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os níveis de tensão estabelecidos pelo art. 1º do Decreto nº 97.280, de 16 de dezembro de 1988, adotado pelo Operador Nacional do Sistema

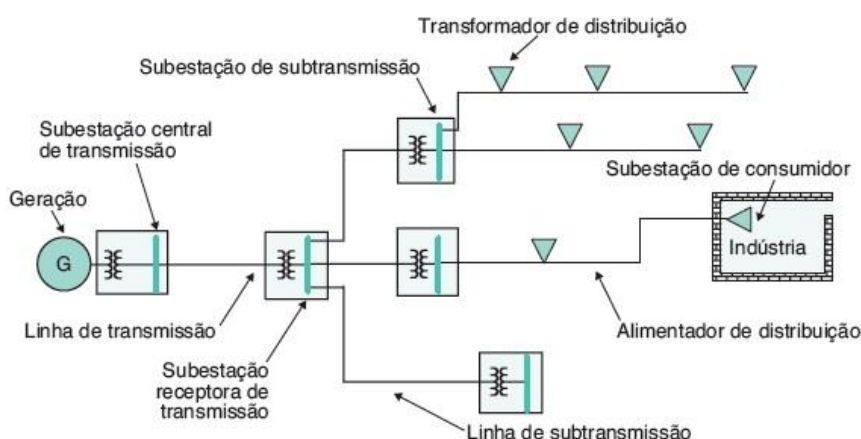
(ONS), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e concessionárias, são definidos os seguintes tipos de subestação:

- *Baixa tensão: possuem níveis de tensão inferiores a 1 KV.*
  - *Média tensão: possuem níveis de tensão entre 1 e 34,5 KV.*
  - *Alta tensão: possuem níveis de tensão entre 34,5 e 230 KV.*
  - *Extra alta tensão: possuem níveis de tensão superiores a 230 KV.*
- (FRANÇA, 2012)

### 2.1.3 Função no Sistema Elétrico

Segundo (MAMEDE FILHO, 2017) as subestações podem ser classificadas conforme a sua funcionalidade no sistema elétrico, de acordo com a Figura 2.3 e detalhadas abaixo.

**Figura 2. 3** Classificação das subestações no SEP com respectivas funções.



Fonte: MAMEDE FILHO, 2017

- **Subestação Central de Transmissão ou Elevadora:** Instalada próxima aos centros de geração, com o propósito de elevar os níveis de tensão, permitindo maior transmissão de potência com menor custo.
- **Subestação Receptora de Transmissão ou Seccionadora:** Instalada entre os centros de consumo e geração, conectam as linhas de transmissão e tem como função seccionar circuitos e isolar partes do sistema, mantendo o nível de carga.
- **Subestação de Subtransmissão ou Abaixadora:** Instalada próxima aos centros de consumo, com a função de rebaixar a tensão alimentando consumidores primários e distribuindo para as subestações distribuidoras, que irão abastecer os consumidores secundários.

- **Subestação de Consumidor ou Distribuidora:** Instalada em propriedades particulares, alimentadas em média tensão e com o designio de reduzir a tensão para o nível apropriado do consumidor final.

#### 2.1.4 *Modo de Instalação*

O procedimento de instalação de uma subestação dependerá do local a ser instalada, condição técnica, finalidade e aspectos econômicos, podendo ser classificada em subestação externa ou interna.

- **Subestação Externa ou Ao Tempo:** Instalada em área descoberta, ficando exposta ao ambiente e necessitando de equipamentos que operem sob condições adversas. (FRANÇA, 2012) A Figura 2.4 apresenta uma subestação externa.

**Figura 2. 4** Subestação Externa ou Ao Tempo Brasília Sul, localizada em Brasília (DF).



Fonte: AMBAR, 2018.

- **Subestação Interna ou Abrigada:** Instalada em área coberta e/ou protegida de condições atmosféricas e fatores externos. Construídas em alvenaria ou invólucro metálico conforme as Figuras 2.5 e 2.6. (MAMEDE FILHO, 2017)

**Figura 2. 5** Subestação Abrigada em Alvenaria.



Fonte: HABITISSIMO, 2018.

**Figura 2. 6** Subestação Abrigada em Invólucro Metálico.



Fonte: GRAZIANO, 2018.

### **2.1.5 Modelo da subestação que será dimensionado a malha de aterramento**

No Brasil a partir de 60 KVA é exigido a instalação de uma subestação abaixadora, onde todas as normativas estabelecidas na NBR 14039:2005, juntamente com as regulamentações da Concessionária local devem ser cumpridos. (CREDER, 2013)

Aquiescente ao objetivo deste trabalho, será utilizado o modelo de uma subestação abaixadora em alvenaria com potência de 1.500 KVA com uma tensão de

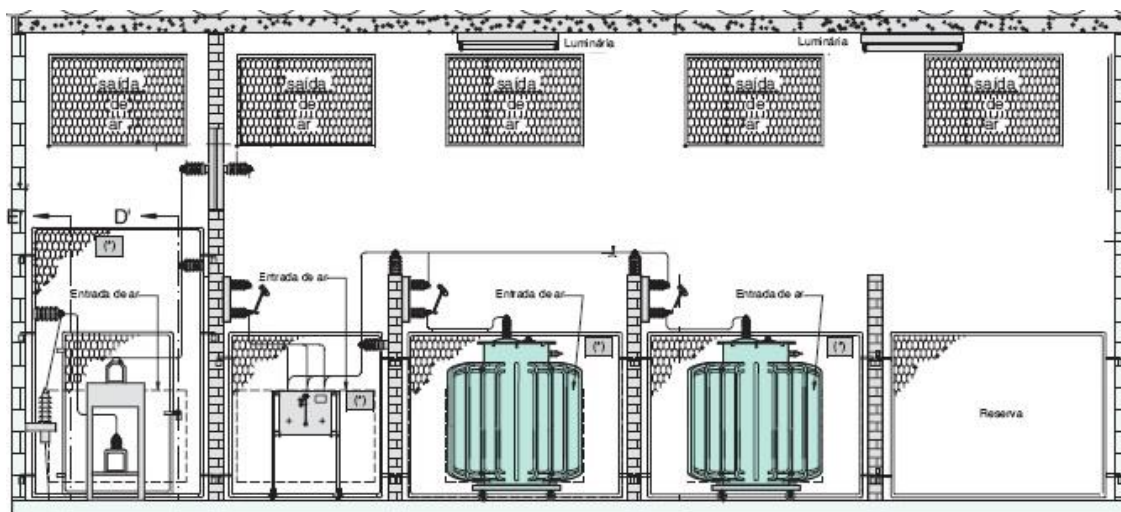


entrada de 13,8 KV, conforme exemplo de aplicação discriminado no (MAMEDE FILHO, 2017).

O exemplo utilizado contém os seguintes compartimentos: Cubículo de medição, Cubículo do disjuntor, Cubículo de transformação composto por 02 transformadores de 750 KVA mais uma Área Reserva, destinada para futura ampliação.

A Figura 2.7 exemplifica a subestação modelo. Os demais layouts referentes a subestação que será utilizada, podem ser verificados no Anexo A e B.

**Figura 2. 7** Subestação modelo.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MAMEDE FILHO, 2017).

## 2.2 Conceitos sobre aterramento elétrico

Quando ocorre um defeito no sistema elétrico, como um curto circuito envolvendo a terra, espera-se que a corrente produzida, seja eliminada ou atenuada pelo sistema de proteção.

Durante o tempo em que a proteção não atuou, a corrente de defeito transcorre a terra, ocasionando potenciais distintos nas massas metálicas e superfícies do solo. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

O aterramento é uma ligação proposital entre partes elétricas e a terra, através de um condutor com o propósito de formar um caminho condutivo de eletricidade. (ABNT, 2013).

Conforme (CRUZ; ANICETO, 2012) há três tipos de aterramento:

1. **Aterramento funcional:** Consiste na ligação, de um dos condutores do sistema elétrico com a terra, normalmente o neutro, com o objetivo de garantir segurança e confiabilidade à instalação.
2. **Aterramento de proteção:** Consiste na ligação à terra, das massas e dos elementos condutores alheios a instalação.
3. **Aterramento de trabalho:** É uma ligação provisória, com o objetivo de fornecer segurança aos usuários da instalação.

Portanto, a prática de aterrar é ligar os equipamentos e massas a terra, juntamente com os processos e componentes envolvidos que constituem o sistema de aterramento.

### **2.2.1 Aterramento de sistema**

O estudo sobre aterramento de sistema, corresponde à forma como o sistema elétrico é conectado ao solo. A seguir são definidos os tipos de aterramentos, conforme (VISACRO FILHO, 2002).

- **Sistema isolado:** Não existe conexão condutiva entre o sistema elétrico e o solo, o acoplamento entre ambos é fraco. O nível das máximas sobretensões possíveis, neste tipo de sistema, é elevado e existem dificuldades na localização de eventuais faltas para a terra.
- **Sistema solidamente aterrado:** Possui alguns pontos do sistema elétrico diretamente à terra, objetivando o caminho com menor impedância, para o escoamento da corrente de falta.
- **Sistema aterrado por impedância:** Reúne as vantagens dos dois sistemas anteriores, inserindo uma impedância (resistência ou reatância) entre o sistema elétrico e a conexão de aterramento.

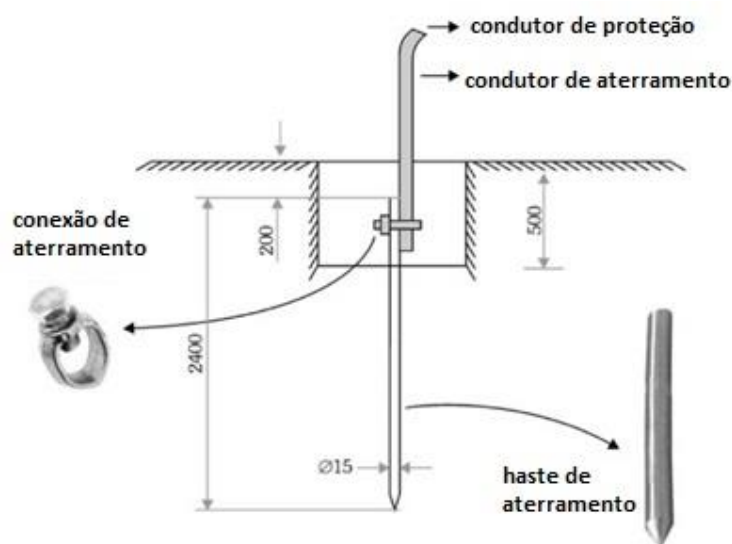
### **2.2.2 Sistema de aterramento**

Diferentemente do conceito de aterramento de sistema, forma como o sistema elétrico é ligado ao solo, sistema de aterramento corresponde aos arranjos físicos de

conexão, o que inclui os materiais a serem utilizados, geometria do eletrodo e locação do terreno. (CREDER, 2013)

Sistema de aterramento é o conjunto de condutores, eletrodos e conexões, interligados ou não, as demais partes metálicas do sistema, retratado na Figura 2.8.

**Figura 2. 8** Componente de um sistema de aterramento.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (CRUZ; ANICETO, 2012).

Segundo a (ABNT, 2013), eletrodo de aterramento é o elemento ou conjunto de elementos do sistema, que assegura o contato elétrico com o solo e dispersa a corrente de defeito, de retorno ou de descarga atmosférica.

Toda instalação deve possuir uma infraestrutura de aterramento, onde o eletrodo de aterramento pode ser uma simples haste, variadas hastes ou mesmo o conjunto de ferragens, estrutura e partes metálicas da instalação. (CREDER, 2013)

Existem diversas configurações de eletrodos, que dependerá das dimensões e finalidades da instalação a ser dimensionada. Na prática, se destaca a técnica de eletrodos em malha ou malha de aterramento. (CRUZ; ANICETO, 2012)

No caso de subestação, o eletrodo de aterramento e sua geometria é de suma importância para a proteção da instalação, principalmente em condições de falta para a terra e distúrbios ocasionados por curto-circuito. (MODENA; SUETA, 2011)



### 2.2.3 Componentes da malha de aterramento

Conforme a Figura 2.8, os principais elementos que compõe uma malha de aterramento são descritos abaixo.

#### 2.2.3.1 Haste de aterramento

A haste de aterramento possui forma alongada, retratado na Figura 2.9, de modo que facilite a penetração ao solo e possibilite a dispersão da corrente de falta, minimizando os potenciais de passo e toque. (CRUZ; ANICETO, 2012)

**Figura 2. 9** Modelos de haste de aterramento.



Fonte: FERRAMENTAS, 2018.

Segundo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995), o material que compõe a haste de aterramento deve ter as seguintes características:

- Ser bom condutor de eletricidade;
- Deve possuir alta resistência as ações dos ácidos e sais dissolvidos no solo;
- Deve sofrer a menor ação possível de corrosão galvânica;
- Resistência mecânica compatível com a cravação e movimentação do solo.

Os principais tipos de haste para malha de aterramento, de acordo com (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995) são:

- **Tipo Copperweld:** Barra de aço de seção circular, onde o cobre é fundido.
- **Tipo Encamisado por Extrusão:** Barra com alma de aço revestida, por meio do processo de extrusão.

- **Tipo Cadweld:** O cobre é depositado eletroliticamente sobre a alma de aço.
- **Tipo Aço Galvanizado:** Composta por eletrodos de ferro e afins.

### 2.2.3.2 Condutor de aterramento

É o elemento que une os eletrodos de terra ao ponto equipotencialização. Utiliza-se em subestações condutores acima de  $25 \text{ mm}^2$ , porém sua dimensão dependerá do nível de corrente falta do sistema. (MAMEDE FILHO, 2017).

O condutor de aterramento é estimado considerando os efeitos térmicos e mecânicos da corrente elétrica, proveniente dos distúrbios no sistema elétrico. (MODENA; SUETA, 2011)

### 2.2.3.3 Conexões de aterramento

As conexões de aterramento são metálicas, com a finalidade de unir os condutores. Conforme (MAMEDE FILHO, 2017) destaca-se os seguintes conectores:

- **Conectores aparafusados:** Peças metálicas, utilizadas na emenda de condutores. Se possível, o emprego desses conectores deve ser evitado. A Figura 2.10-a ilustra o conector aparafusado.
- **Conexão exotérmica:** Processo que fundi o elemento metálico de conexão e o condutor. A Figura 2.10-b mostra a conexão exotérmica do tipo T, enquanto a Figura 2.10-c ilustra o tipo X.

**Figura 2. 10** Tipos de conectores para malha de aterramento.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MAMEDE FILHO, 2017).

#### 2.2.3.4 Condutor de proteção

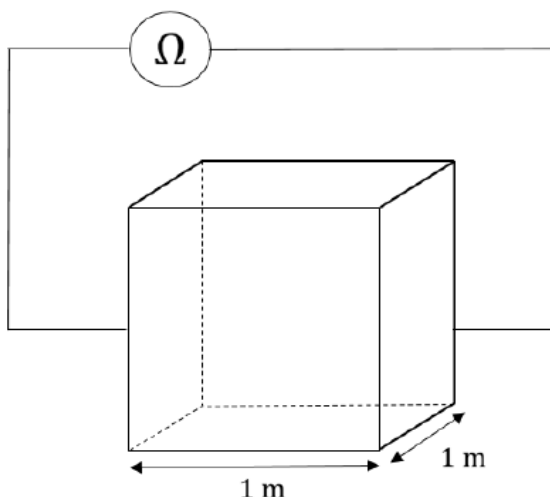
O condutor de proteção tem o objetivo de realizar o aterramento das massas metálicas do sistema, visando a proteção do usuário contra choques elétricos, devido a contato indiretos a carcaças dos equipamentos que foram carregadas por uma falta no sistema ou efeito de atuação dos dispositivos de proteção. (CREDER, 2013)

#### 2.2.4 Resistividade do solo

Um dos fatores mais relevantes no dimensionamento do sistema de aterramento é a resistividade do solo, a partir deste parâmetro é possível definir a resistência de terra, consequentemente a topologia mais adequada para instalação em análise.

Para (VISACRO FILHO, 2002) resistividade do solo é definida como a resistência elétrica, medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias, preenchido com este solo. A Figura 2.11 ilustra o modelo, enquanto Equação 1 expressa matematicamente a resistividade do solo.

**Figura 2. 11** Modelo de cubo unitário para medição de resistividade.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (FLORES, 2014).

$$\rho = R \times \frac{A}{l}$$

(1)

Sendo:

$\rho$ : resistividade do solo [ $\Omega \cdot m$ ]

$l$ : dimensão da aresta [ $m$ ]

$A$ : área de uma face do cubo [ $m^2$ ]

Difícilmente o solo apresenta homogeneidade, a resistividade sofre influência de diversos fatores, como o tipo de solo, umidade, temperatura e fatores externos. (VISACRO FILHO, 2002)

### Tipo de solo:

Empiricamente terrenos semelhantes apresentam resistividades distintas, entretanto, é possível determinar valores para diferentes tipos de solo, conforme Tabela 2.1. (VISACRO FILHO, 2002)

**Tabela 2. 1** Resistividade para diversos tipos de solo.

<b>Tipos de solo</b>	<b>Faixa de resistividades estimada [<math>\Omega \cdot m</math>]</b>
Água do mar	Menor que 10
Lama, limo, húmus	Até 150
Argila	300
Calcário	500 – 5.000
Areia	1.000 – 8.000
Basalto	A partir de 10.000
Concreto	Molhado (*): 20 – 100
	Úmido: 300 – 1.000
	Seco: 3 $k\Omega \cdot m$ – 2 $M\Omega \cdot m$

(\*) Típica de aplicação em ambientes externos, fundações e demais aplicações afins. Destacando que valores inferiores a  $50 \Omega \cdot m$  devem ser considerados altamente corrosivos.

Fonte: ABNT, 2013.

### Umidade do solo:

A condução da corrente elétrica no solo, ocorre por processo eletrolítico. O percentual de umidade no solo, faz com que os sais se dissolvam, formando um meio favorável à passagem das cargas elétricas. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

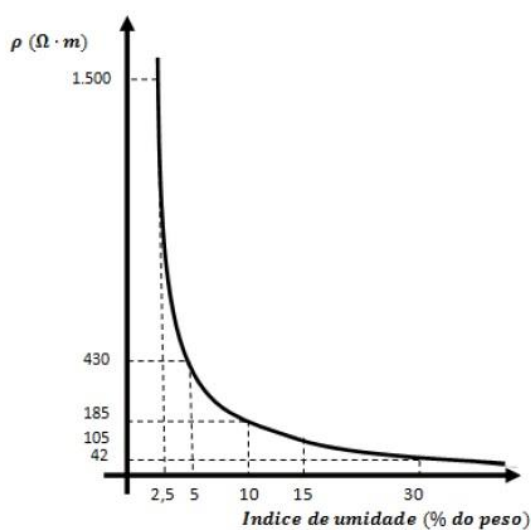
Em geral, a resistividade reduz com o aumento da umidade do solo, para variações do índice de 0 a 18%, retratados na Tabela 2.2 e Figura 2.12. (VISACRO FILHO, 2002)

**Tabela 2. 2** Resistividade conforme o nível de umidade do solo.

Umidade [%]	Resistividade [ $\Omega \cdot m$ ]
0	10.000
2,5	1.500
5,0	430
10	185
15	105
20	63
30	42

Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995.

**Figura 2. 12** Efeito da umidade na resistividade do solo.



Fonte: VISACRO FILHO, 2002.

No terreno, a quantidade de água depende de fatores como condições climáticas, formação geológica, existência de lençóis freáticos, configurações do solo, índice pluviométrico e outros mais.

Portanto o aterramento tende a se tornar mais eficiente, em períodos que o solo apresente menor resistividade devido a ter solos mais úmidos, de modo que o contrário se torna verdadeiro.

### Temperatura do solo:

Para solos arenosos, conservando as demais características e variando a temperatura, a resistividade comporta-se segundo a Tabela 2.3 (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

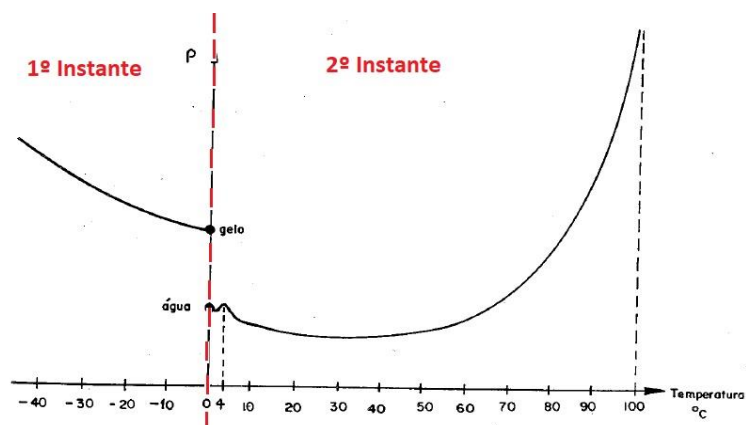
**Tabela 2. 3** Efeito da temperatura na resistividade do solo.

Temperatura [°C]	Resistividade Solo [ $\Omega \cdot m$ ]
+20	72
+10	33
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3.300

Fonte: VISACRO FILHO, 2002.

Segundo a Figura 2.13, a resistividade do solo apresenta dois instantes, conforme varia a temperatura.

**Figura 2. 13** Comportamento da resistividade em relação a temperatura.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

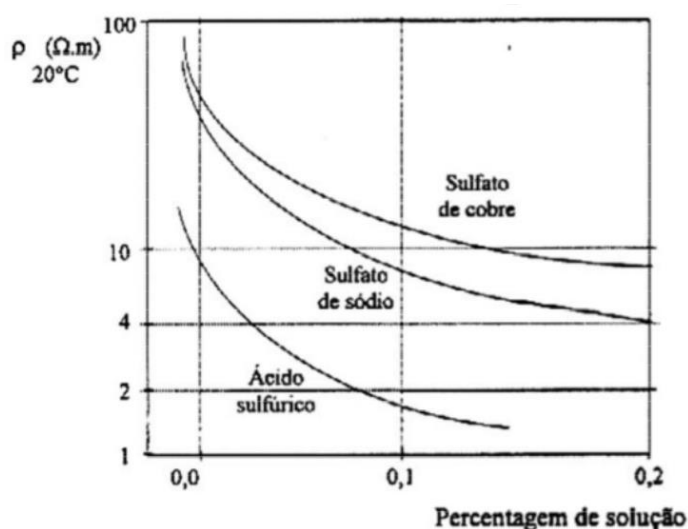
**1º instante:** Devido à diminuição da temperatura, a água solidifica e ocorre uma separação das ligações iônicas, elevando a resistividade. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

**2º instante:** Devido à elevação da temperatura, a água evapora mais, o que reduz a umidade do solo, resultando numa elevação da resistividade. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

### Compacidade do solo e Concentração e tipos de sais dissolvidos na água:

O processo de condução da corrente de falta através do solo ocorre por meio eletrolítico, propriedade diretamente relacionada com a quantidade de sais dissolvidos no solo, fator que determina diretamente a resistividade do terreno, consoante a Figura 2.14 e Tabela 2.4. (VISACRO FILHO, 2002)

**Figura 2. 14** Efeito do tipo e concentração de sais na resistividade de solo.



Fonte: VISACRO FILHO, 2002.

**Tabela 2. 4** Influência da concentração de sais na resistividade do solo.

Sal adicionado [% em peso]	Resistividade Solo [Ω. m]	Sal adicionado [% em peso]	Resistividade Solo [Ω. m]
0	107	5,0	1,9
0,1	18	10,00	1,3
1,0	1,6	20,00	1,00

Fonte: VISACRO FILHO, 2002

### 2.2.5 Resistência de aterramento

O conceito de aterramento é comumente definido como uma ligação a terra. Esta conexão apresenta resistência, capacitância e indutância. (VISACRO FILHO, 2002)

Em condições de baixa frequência e corrente, os valores de resistividade do solo são reduzidos, sendo efêmero o efeito dos parâmetros complexos no sistema, que se comportará como uma resistência linear. (VISACRO FILHO, 2002)

Denomina-se resistência de terra, a oposição oferecida à passagem da corrente elétrica através de um eletrodo para o solo, conforme a Equação 2. (VISACRO FILHO, 2002)

$$R_T = \frac{V_T}{I} \quad (2)$$

Sendo:

$R_T$ : resistência oferecida pelo eletrodo à passagem da corrente [ $\Omega$ ].

$V_T$ : queda de tensão no eletrodo [ $V$ ].

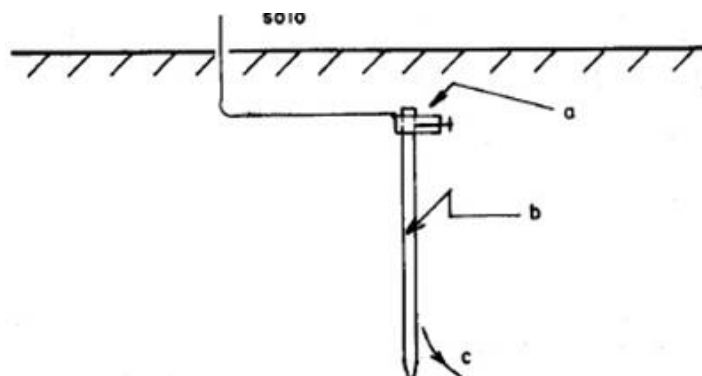
$I$ : corrente injetada no solo [ $A$ ].

A seguir são definidos os tipos de resistência de aterramento conforme (VISACRO FILHO, 2002), ilustrados na Figura 2.15.

- a. **Resistência própria dos eletrodos e das ligações elétricas ao mesmo:** Frequentemente de valor reduzido, dada a condutividade dos metais utilizados.
- b. **Resistência de contato entre o eletrodo e a terra circunvizinha:** Efêmero se o contato do eletrodo com o solo for bom, e caso, o eletrodo não esteja coberto de material isolante.
- c. **Resistência da terra circunvizinha ao eletrodo:** Elemento de maior valor da resistência de aterramento, e que depende diretamente da resistividade do solo, distribuição da corrente em relação a forma e dimensão do eletrodo.



**Figura 2. 15** Resistências de um sistema de aterramento.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

## 2.3 Medição da resistividade

O modelo de representação da resistividade do solo e sua mensuração, tem o intuito de dimensionar o esquema mais apropriado de malha, consoante aos parâmetros apresentados pelo terreno.

A medição da resistividade do solo é feita através de dois processos, de acordo com (VISACRO FILHO, 2002).

1. **Medição por amostragem:** Consiste em retirar uma amostra do solo, onde será projetado o aterramento, e analisar em laboratório.
2. **Medição local:** Consiste em instalar hastes no local que será dimensionado o aterramento, através da injeção de corrente nas hastes externas é verificado os potenciais nas hastes internas, neste tocante, é possível determinar as características do solo.

### 2.3.1 Medição por amostragem

Este método laboratorial, se baseia na retirada de uma amostra do solo, em certa profundidade de modo que o mesmo tenha sofrido as menores intervenções externas e variações ambientais. (VISACRO FILHO, 2002)

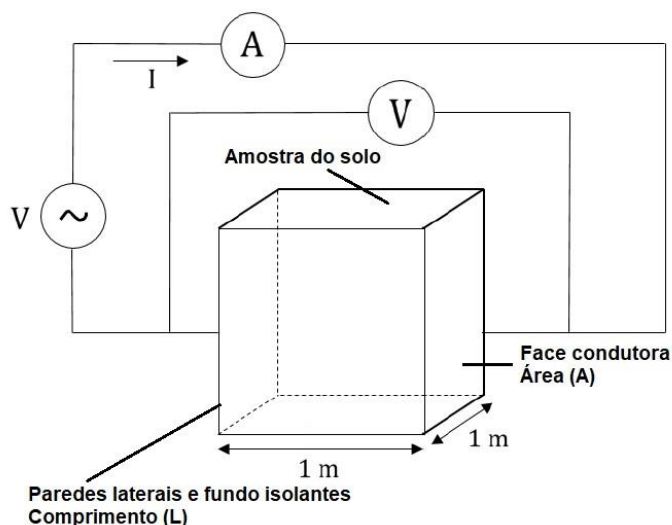
O procedimento consiste em medir a resistência entre as duas faces opostas de um cubo, preenchido com amostra do solo em ensaio. O cubo deverá ser um material isolante. (VISACRO FILHO, 2002)

A Figura 2.16 ilustra este método, onde a resistividade pode ser determinada através da Equação 1 e expressa por meio da Equação 3.

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad [\Omega]$$

(3)

**Figura 2. 16** Medição da resistividade em laboratório.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (FLORES, 2014).

Esta medição não garante ao solo estratificado as mesmas características do local, logo, a técnica não possui resultado confiável.

### 2.3.2 Medição local

Buscando aumentar a confiabilidade dos parâmetros analisados, devido a imperfeição do solo, é realizado a medição local do terreno, para determinar a resistividade aparente, dado fundamental no dimensionamento da malha de terra

Os métodos de medição local são: método de Wenner, método de Lee e método de Schlumberger (Palmer). Porém, o mais conhecido e utilizado é a configuração de Wenner, técnica que será utilizada neste trabalho. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

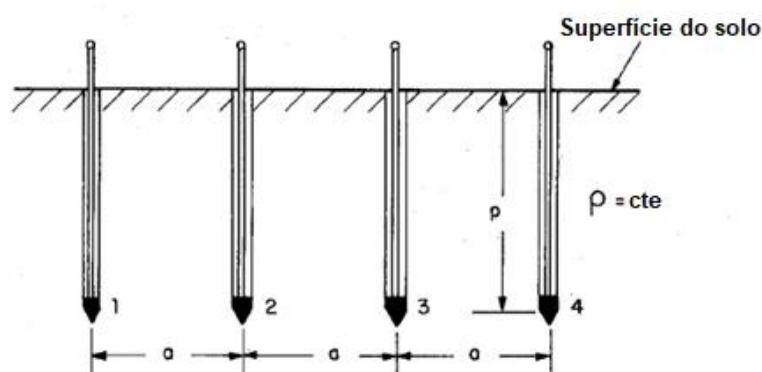
Outro item importante é o espaçamento entre as hastes, quando o distanciamento é pequeno, a resistividade medida indica o valor naquele local,

portanto, é necessário expandir a área onde será determinado o sistema de aterramento e aumentar o número de medições. (VISACRO FILHO, 2002)

### 2.3.3 Método de Wenner

O arranjo de Wenner emprega quatro pontos alinhados, igualmente espaçados e cravados a uma mesma profundidade, conforme a Figura 2.17. (ABNT, 2012)

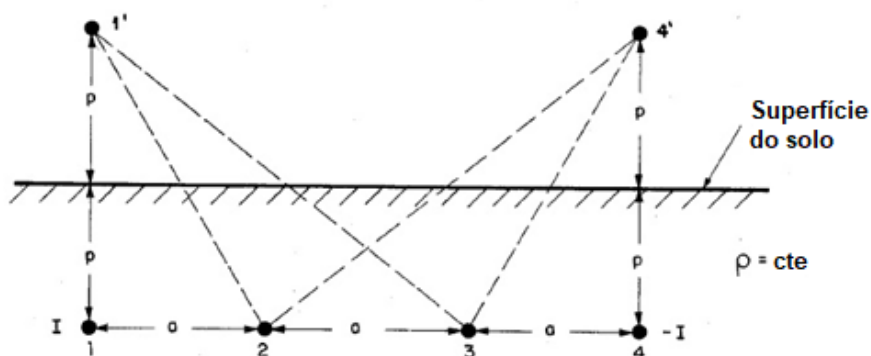
**Figura 2. 17** Arranjo de Wenner.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Uma corrente elétrica injetada no ponto 1 pela primeira haste, é coletada no ponto 4 pela última haste. A corrente que percorreu o solo, entre os pontos 1 e 4, gera potencial nos pontos 2 e 3. Através do método das imagens, é possível verificar os potenciais descritos nas Equações 4 e 5, representados na Figura 2.18. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

**Figura 2. 18** Imagens dos pontos 1 e 4 do arranjo de Wenner.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Potencial nos pontos 2 e 3:

$$V_2 = \frac{\rho \times I}{4\pi} \times \left[ \frac{1}{a} + \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (4)$$

$$V_3 = \frac{\rho \times I}{4\pi} \times \left[ \frac{1}{2a} + \frac{1}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} - \frac{1}{a} - \frac{1}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} \right] \quad (5)$$

A diferença de potencial entre os pontos 2 e 3:

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{\rho \times I}{4\pi} \times \left[ \frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad (6)$$

Aplicando a Lei de Ohm, é possível determinar a resistência elétrica do solo para uma aceitável profundidade de penetração da corrente. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

$$V = R \times I = R = \frac{V_{23}}{I} = \frac{\rho \times I}{4\pi} \times \left[ \frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \rightarrow$$

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \times \left[ \frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}} \right] \quad [\Omega] \quad (7)$$

Logo, a resistividade é dada através da Equação 8.

$$\rho = \frac{4\pi a R}{\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega \cdot m] \quad (8)$$

Sendo:

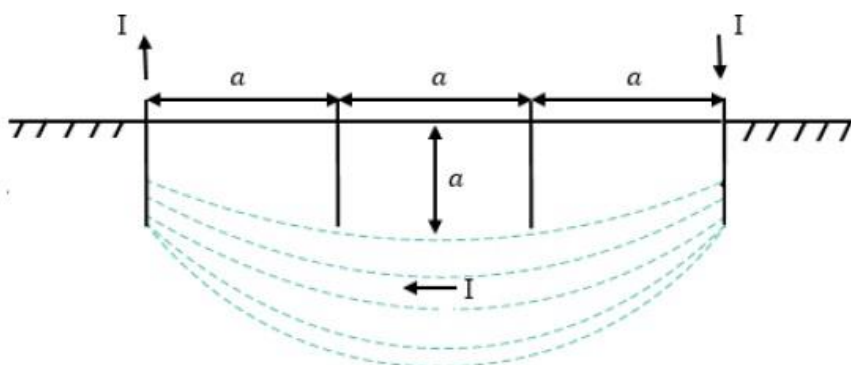
$a$ : espaçamento entre os eletrodos  $[m]$ .

$p$ : profundidade que os eletrodos estão enterrados  $[m]$ .

### 2.3.3.1 Medição pelo método de Wenner

De acordo com (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995), o método considera que 58% da distribuição de corrente que passa entre as hastes externas, ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes, retratado na Figura 2.19.

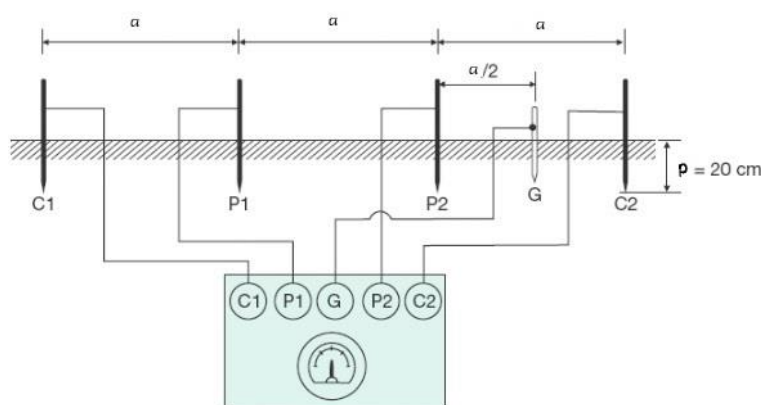
**Figura 2. 19** Penetração da corrente nas hastes pelo solo.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MAMEDE FILHO, 2017).

O processo de medição local é feito com um terrômetro, utiliza-se o tipo Megger, exemplificado na Figura 2.20.

**Figura 2. 20** Ligação do Megger aos eletrodos de medida de resistividade no solo.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MAMEDE FILHO, 2017).

Através de sua fonte interna, o Megger injeta uma corrente nos terminais C1 e C2. As duas hastes internas são ligadas nos terminais P1 e P2, assim o aparelho verifica a queda de potencial nestes pontos e indica o valor da resistência, consoante a Equação 8. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

A partir da Equação 8 que varia o denominador entre 1 e 2, dependendo da relação entre a profundidade ( $p$ ) e o espaçamento ( $a$ ). Segundo (VISACRO FILHO, 2002) é possível inferir que:

- Quando  $p$  é muito grande em relação a  $a$ :

$$\rho = 4\pi aR$$

(9)

- Quando  $p$  é muito pequeno em relação a  $a$

$$\rho = 2\pi aR$$

(10)

### 2.3.3.2 Direções a serem medidas

Consoante a (ABNT, 2012), define-se medição como o conjunto de leituras obtidas em uma mesma direção de travamento e diversos espaçamentos entre hastes, realizado conforme um dos métodos estabelecidos em norma.

O número de medições a serem feitos, dependem da localização do aterramento, dimensões do sistema a ser aterrado e divergência dos valores mensurados nos espaçamentos determinados. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

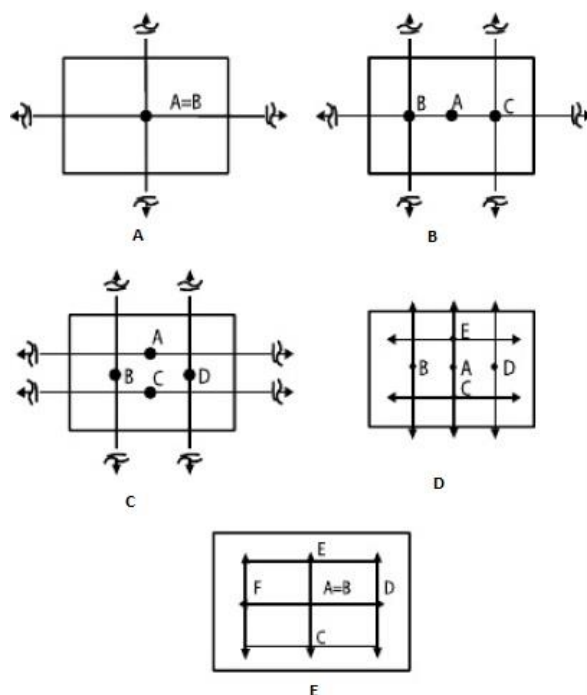
Para um terreno dentro das faixas especificadas pela Tabela 2.5 e Figura 2.21, a (ABNT, 2012) orienta o número mínimo de linhas de medição.

**Tabela 2. 5** Número mínimo de linhas de medição para dimensões do terreno.

Área do terreno [ $m^2$ ]	Número mínimo linhas de medição	Exemplo para linhas de medição
$S \leq 1.000$	2	Figura 2.29-a
$1.000 \leq S \leq 2.000$	3	Figura 2.29-b
$2.000 \leq S \leq 5.000$	4	Figura 2.29-c
$5.000 \leq S \leq 10.000$	5	Figura 2.29-d
$10.000 \leq S \leq 20.000$	6	Figura 2.29-e

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (ABNT, 2012).

**Figura 2. 21** Croquis para medição da resistividade.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (ABNT, 2012).

Caso a área seja superior, deve-se dividir o terreno remanescente em áreas de até  $10.000 \text{ m}^2$ , acrescentando-lhe linhas de medição equivalentes às descritas na Tabela 2.5. (MODENA; SUETA, 2011)

Habitualmente, recomenda-se as medições de resistividade para os espaçamentos exemplificados na Tabela 2.6. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

**Tabela 2. 6** Espaçamentos recomendados.

Espaçamento $a$ [m]	Leitura $R$ [ $\Omega$ ]	Calculado $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]
1		
2		
4		
6		
8		
16		

Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995.

### 2.3.3.3 *Análise das medidas*

Finalizado as medições, os valores compilados serão analisados e julgados, se serão aceitos ou rejeitados. De acordo com (MAMEDE FILHO, 2017), esta avaliação ocorre nas seguintes etapas:

- Calcular a média aritmética dos valores de resistividade do solo para cada espaçamento considerado.
- Calcular o desvio de cada média em relação à média aritmética anteriormente determinada.
- Desprezar os valores que apresentarem um desvio maior que 50% em relação à média.
- Se os valores analisados apresentarem desvio superiores a 50%, de maneira recorrente, deverá ser refeita as medições locais. Caso persista os desvios superiores, a região em análise será considerada como independente.

### 2.3.3.4 *Cuidados na Medição*

Durante o processo de medição, é necessária atenção para os pontos a seguir, de acordo com (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995) os descuidos abaixo podem comprometer a eficiência do aterramento.

- Os eletrodos devem estar alinhados e igualmente espaçados.
- As hastes devem estar firmemente cravadas e numa mesma profundidade.
- Considerar as condições do solo durante a medição.
- Não realizar as medições em dias de risco de descargas atmosféricas ou condições adversas.
- Utilizar equipamentos de proteção individual e coletiva.

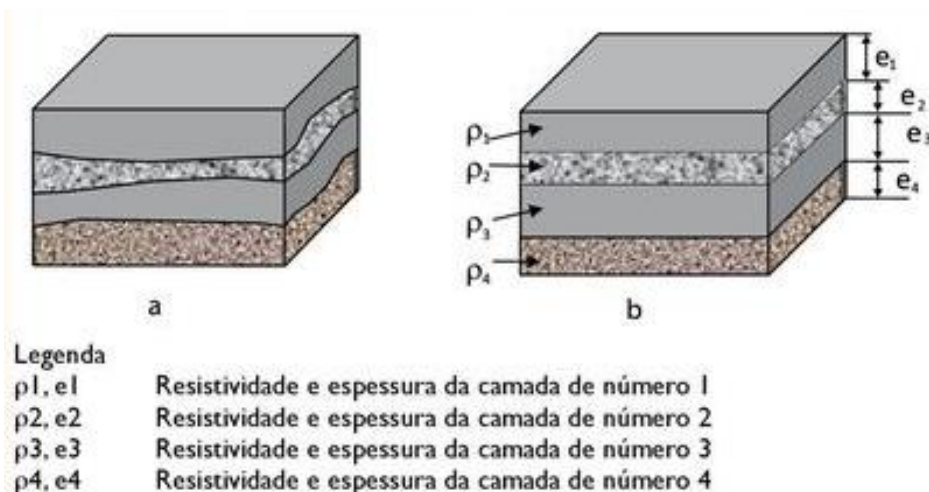
### 2.3.4 **Estratificação do solo**

Devido as diferentes formações geológicas, composições químicas e resistividades distintas para o mesmo local, a modelagem em camadas estratificadas, isto é, em camadas horizontais, tem aumentado a eficiência do aterramento a ser projetado. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)



A Figura 2.22 exemplifica a estratificação do solo (direito) e o solo real (esquerdo), a seguir os principais métodos são detalhados.

**Figura 2. 22** Exemplo de estratificação do solo.



Fonte: MODENA; SUETA, 2011.

Conforme a (ABNT, 2012), apresenta dois tipos distintos de estratificação do solo: Modelagem em duas camadas e Modelagem em várias camadas. Cada uma dessas modelagens apresenta métodos específicos.

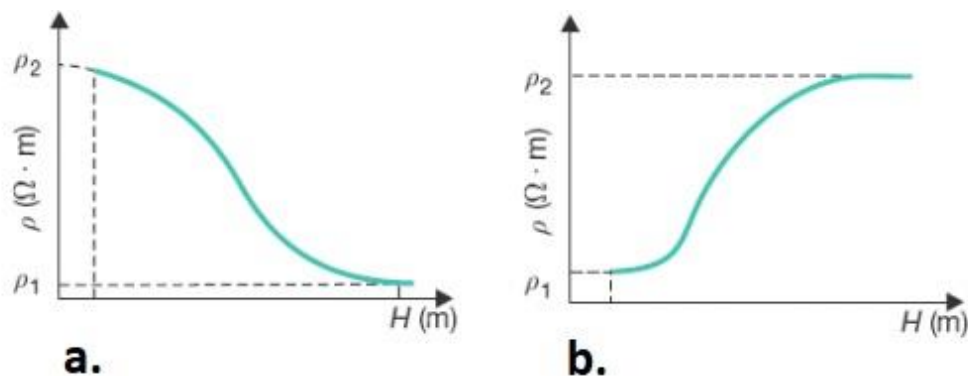
Durante as pesquisas, o procedimento mais recomendado e utilizado para a estratificação do solo, é o método simplificado de estratificação em duas camadas.

Baseado nas bibliografias de aterramento para subestação e indicação na (ABNT, 2013), observou-se que o método apresenta resultados satisfatórios e com margens de erro pequena. Portanto, será apresentado esta técnica para cálculo da resistividade média.

#### 2.3.4.1 Método simplificado para estratificação do solo em duas camadas

Neste procedimento é elaborado um gráfico, ilustrado na Figura 2.23, em função da resistividade pelo espaçamento, aplicável apenas quando o terreno puder ser estratificado em duas camadas. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

**Figura 2. 23** Curvas  $\rho(a) \times a$  para solo e duas camadas.

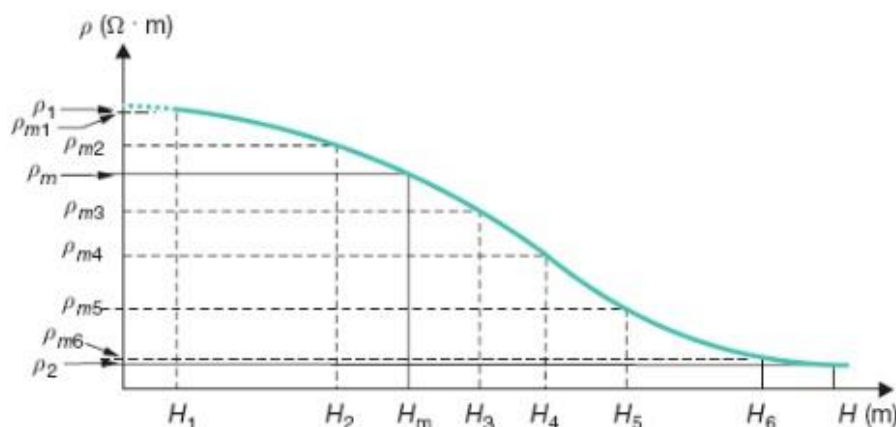


Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MAMEDE FILHO, 2017).

Assim a assíntota para pequenos espaçamentos é típica da contribuição da primeira camada do solo. Já para espaçamentos maiores, tem-se a penetração da corrente na segunda camada, o que caracteriza um solo distinto. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

Através do prolongamento das assíntotas de  $\rho_1$  e  $\rho_2$  é possível determinar seus valores e traçar a curva  $\rho(a) \times a$ , semelhante à Figura 2.24. (ABNT, 2012)

**Figura 2. 24** Exemplo de gráfico  $\rho(a) \times a$ .



Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.

Obtida as duas resistividades, determina-se a relação entre as duas resistividades, conforme Equação 11. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = K_1$$

(11)

Sendo:

$\rho_1$  e  $\rho_2$ : resistividade da primeira e segunda camada [ $\Omega \cdot m$ ].

$K_1$ : constante proveniente entre a relação  $\rho_1/\rho_2$ .

Com o valor de  $K_1$ , utiliza-se a tabela detalhada no Anexo C para determinar a resistividade média ( $\rho_m$ ), retratada na Equação 12.

$$\rho_m = K_1 \times \rho_1 \quad [\Omega \cdot m] \quad (12)$$

Calculado  $\rho_m$ , o valor é localizado na curva  $\rho(a) \times a$  para determinar a profundidade ( $H_m$ ). No Apêndice A está sintetizado o passo a passo, incluindo o cálculo da resistividade medida por este método. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

#### 2.3.4.2 Resistividade aparente

Segundo (MAMEDE FILHO, 2017), a resistência elétrica de um sistema de aterramento depende de dois fatores principais:

1. Resistividade aparente do solo para malha a ser dimensionada.
2. Geometria e forma que serão adotadas no projeto

*Resistividade vista por um sistema de aterramento qualquer, em um solo com características de resistividade homogênea ou estratificado em camada, cujo valor é utilizado para cálculo da resistência de aterramento desse sistema. (ABNT, 2009)*

Para dimensionar o projeto de aterramento, é necessário o conhecimento prévio da resistividade aparente do solo, diante disso, a resistividade aparente será estimada utilizando o método simplificado.

#### 2.3.4.3 Cálculo da resistividade aparente do solo pelo método simplificado em duas camadas

Para determinar a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) a partir do método simplificado, é necessário encontrar o parâmetro  $K_2$  através da Equação 13. Porém, antes de

encontrar  $K_2$ , deve-se determinar o raio do círculo equivalente a malha de terra ( $R$ ), formulado nas Equações 14,15 e 16. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$K_2 = \frac{R}{H_m} \quad (13)$$

Sendo:

$H_m$ : profundidade da camada de solo correspondente à resistividade média [ $m$ ].

$R$ : raio do círculo equivalente a malha de terra da subestação [ $m$ ] e será dado por:

- Áreas retangulares:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (14)$$

- Hastes ligadas igualmente espaçadas:

$$R = \frac{(N - 1)}{2} \times D_e \quad (15)$$

- Outras configurações:

$$R = \frac{S}{D} \quad (16)$$

$S$ : área da malha de terra [ $m^2$ ].

$N$ : número de eletrodos verticais.

$D_e$ : distância entre os eletrodos verticais [ $m$ ].

$D$ : maior dimensão do terreno [ $m$ ].

Com os valores de  $K_2$  e  $K_1$ , através da tabela detalhada no Anexo D pode-se encontrar o parâmetro de  $K_3$ , fator de multiplicação da Equação 17 para determinar a resistividade aparente ( $\rho_a$ ). (MAMEDE FILHO, 2017)

$$\rho_a = K_3 \times \rho_1 \quad [\Omega.m]$$

(17)

## 2.4 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

De acordo com (ABRACOPEL, 2018), ocorreram 1.387 acidente por origem elétrica durante o ano de 2017 no país. Parte desses acidentes poderiam ter sido evitados se as instalações tivessem um sistema de aterramento adequado.

Apesar do assunto ser normatizado no país, a prática do aterramento ainda é tratada displicentemente. A omissão por profissionais na área da elétrica, provoca danos materiais, podendo ocasionar perda humana.

A seguir são definidos aspectos importantes para o dimensionamento de uma malha de terra eficiente, conforme os efeitos da corrente no corpo humano.

### 2.4.1 Choque elétrico

A passagem da corrente elétrica no corpo humano é conhecida como choque elétrico. De acordo com (VISACRO FILHO, 2002), os efeitos provocados pelo choque são apresentados abaixo.

- Parada respiratória.
- Fibrilação ventricular e uma consequente para cardíaca.
- Queimaduras profundas e consequente necrose dos tecidos.
- Alterações no sangue, provocados pelo efeito térmico decorrentes do choque.

### 2.4.2 Fibrilação ventricular do coração provocados pelo choque elétrico

A fibrilação ventricular é a vibração irregular e desordenada dos músculos do coração, ocasionando a perda da capacidade de bombear sangue. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

### 2.4.3 Limite de corrente suportável

De acordo com a (ABNT, 2013), a corrente máxima de não fibrilação  $I_{CH}$ , para 99,5% das pessoas de 50 kg, num intervalo entre  $0,03s \leq t \leq 3s$  é dada pela Equação 18.

$$I_{CH} = \frac{116}{\sqrt{T_f}} \quad [m.A] \quad (18)$$

## 2.5 Potenciais na superfície do solo

Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que ocasionalmente põe em risco a vida humana. (VISACRO FILHO, 2002)

Visando o correto dimensionamento, é necessária uma análise minuciosa pelo projetista da malha de aterramento, para os potenciais danos provocados pela falta elétrica em uma subestação.

### 2.5.1 Potencial de passo

Potencial de passo ( $V_{passo}$ ) é a máxima diferença de potencial entre os pés, a que ficaria submetida uma pessoa na região do aterramento, durante a ocorrência de uma falta, ilustrado na Figura 2.25-a. (VISACRO FILHO, 2002)

Á partir do circuito da Figura 2.25-b, (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995) determina a equação do potencial de passo.

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \times I_{CH} \rightarrow V_{passo} = (1000 + 6 \times \rho_s) \times I_{CH} \quad [V] \quad (19)$$

Sendo:

$R_{ch}$ : resistência do corpo humano [ $\Omega$ ].

$R_c$ : resistência de contato, que pode ser considerada igual a  $3\rho_s$  [ $\Omega.m$ ].

$\rho_s$ : resistividade superficial do solo aproximadamente 3.000 [ $\Omega.m$ ].

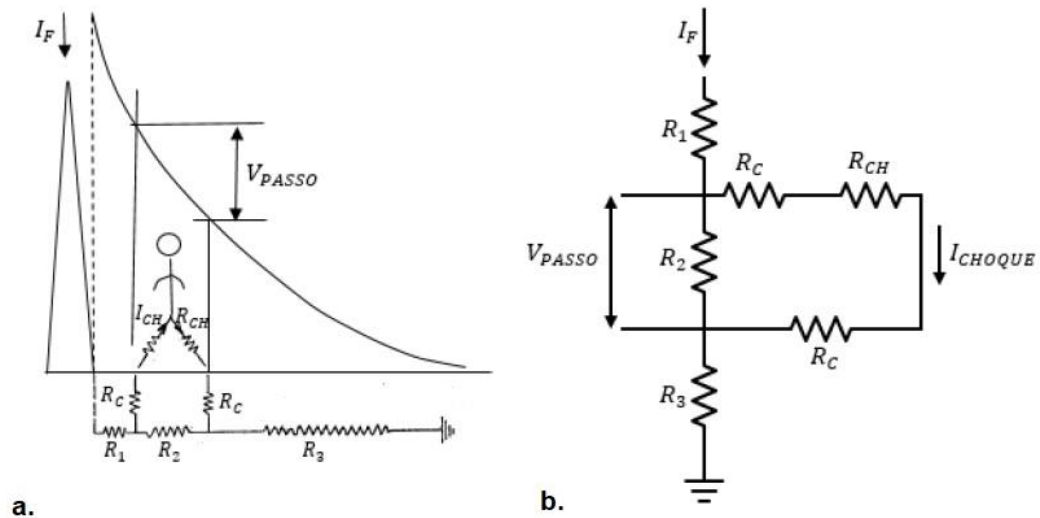
$I_{CH}$ : corrente de choque [ $m.A$ ].

$R_1$  e  $R_2$ : resistências dos trechos de terra considerado [ $\Omega$ ].

O potencial de passo máximo ( $V_{passom\acute{a}x.}$ ) tolerável que garantiria segurança ao usuário da instalação, dado pela Equação 20. (MAMEDE FILHO, 2017).

$$V_{passom\acute{a}x.} = (1000 + 6 \times \rho_s) \times \frac{116}{\sqrt{T_f}} \rightarrow V_{passom\acute{a}x.} = \frac{116 + 0,7 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \quad (20)$$

**Figura 2. 25** Potencial de passo.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

### 2.5.2 Potencial de toque máximo

Potencial de toque ( $V_{toque}$ ) é a máxima diferença de potencial entre a mão e pés, que ficaria submetida uma pessoa ao tocar alguma parte energizada, devido à falta elétrica, representado na Figura 2.26-a. (VISACRO FILHO, 2002)

Á partir da análise do circuito da Figura 2.26-b, determina-se a Equação 21 para potencial de toque. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

$$V_{toque} = \left( R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \times I_{CH} \rightarrow V_{toque} = (1000 + 1,5 \times \rho_s) \times I_{CH} \quad [V]$$

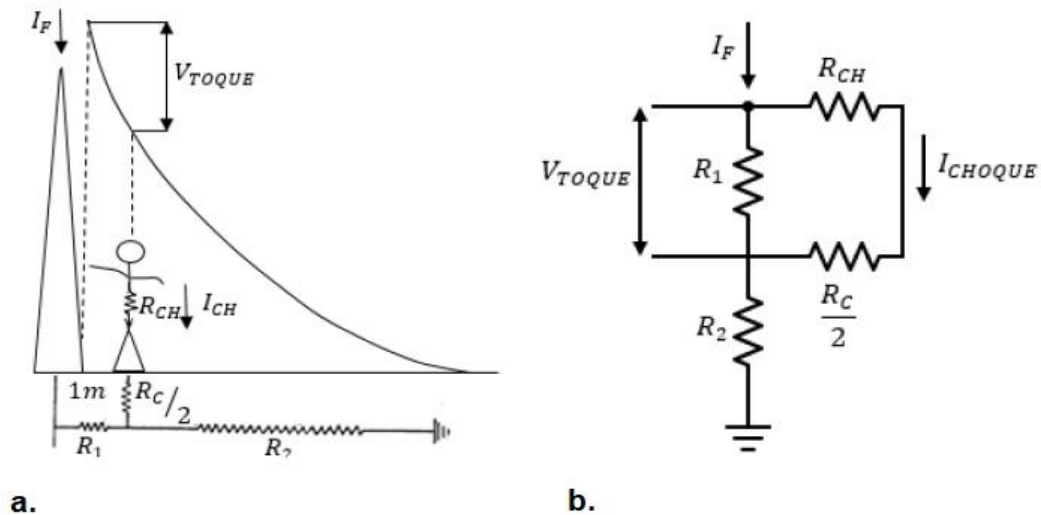
(21)

O potencial de toque máximo ( $V_{toquemáx.}$ ) que garanta segurança em qualquer ponto da malha, conectada a massa metálica energizada, e entra em contato com o corpo, é determinado pela Equação 22. (MAMEDE FILHO, 2017):

$$V_{toquemáx.} = (1000 + 1,5 \times \rho_s) \times I_{CH} \rightarrow V_{toquemáx.} = \frac{116 + 0,174 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}}$$

(22)

**Figura 2. 26** Potencial de toque.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

## 2.6 Dimensionamento de malha de aterramento para subestação

Aspirando uma adequada ligação entre os equipamentos elétricos à terra, otimizando o sistema e reduzindo os potenciais de toque e passo, será apresentado uma síntese, da metodologia comumente aplicada em projetos de aterramento.

### Passo 1. Dados iniciais:

- 1.1. Determinar área da malha pretendida.
- 1.2. Determinar a resistividade superficial do solo ( $\rho_s$ ).
- 1.3. Realizar medições através do método de Wenner.
- 1.4. Calcular a corrente de curto circuito fase terra máxima ( $I_{CFT}$ ).



- 1.5. Calcular a corrente de curto circuito fase terra que escoar pela malha de terra ( $I_{malha}$ ).
- 1.6. Encontrar o tempo de defeito para a máxima corrente de curto circuito ( $T_f$ ).
- 1.7. Verificar se o valor máximo da resistência de terra é compatível com a sensibilidade da proteção.

**Passo 2. Estratificação do Solo:**

- 2.1. Conferir os desvios apresentados pelas medições realizadas através do método de Wenner.
- 2.2. Calcular a resistividade média ( $\rho_m$ ), através do método simplificado do solo em duas camadas.
- 2.3. Determinar a profundidade da primeira camada ( $H_m$ ).

**Passo 3. Resistividade aparente:**

- 3.1. Determinar a geometria dos eletrodos de aterramento.
- 3.2. Cálculo da resistividade aparente ( $\rho_a$ ) pelo método simplificado do solo em duas camadas.

**Passo 4. Dimensionamento do condutor:**

- 4.1. Determinar o tipo de condutor.
- 4.2. Dimensionamento mecânico:

Consoante a (ABNT, 2013), o dimensionamento mecânico e eletromagnético, devem ser protegidos contra corrosões e possuir as mínimas seções aplicáveis, retratados na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7** Seção mínima do condutor de acordo com seu material.

Material	Condutor	Observação
Cobre	50 mm <sup>2</sup>	-
Aço (protegido contra corrosão)	38 mm <sup>2</sup>	Se não houver a proteção no aço, a NBR 5419: 2015 determina uma seção mínima de 80 mm <sup>2</sup> .

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MODENA; SUETA, 2011).

**4.3. Dimensionamento térmico:**

O condutor deve ter uma seção capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima, durante um tempo em que a temperatura se elevar acima de um

valor limite suportável, devido a pequena duração da corrente de curto circuito. (ABNT, 2013)

Para condutores de cobre a Tabela 2.8 fornece valores da seção mínima do condutor  $K$  em função da junção, conforme Equação 23. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$S_c = K \times I_{CFT}$$

(23)

**Tabela 2. 8** Seção mínima do condutor  $mm^2/A$ .

Tempo [s]	Cabo simples – solda exotérmica [K]	Cabo com juntas soldas [K]	Cabo com juntas rebitadas [K]
30	0,020268	0,025335	0,032935
4	0,007093	0,010134	0,012160
1	0,003546	0,005067	0,006080
0,5	0,002533	0,003293	0,004306

Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.

Para condutores do tipo Copperweld é dada a Equação 24, uma variação da fórmula de Onderdonk. O Anexo E apresenta a tabela com as características típicas de um condutor em aço cobreado (MAMEDE FILHO, 2017).

$$S_c = \frac{\sqrt{T_f} \times I_{CFT}}{2 \times 10^3 \times \beta_c} \times K$$

(24)

Sendo:

$S_c$ : seção do condutor [ $m^2$ ].

$I_{CFT}$ : corrente de curto circuito fase terra [A].

$T_f$ : tempo de duração da falha [ $H_z$ ]. Em geral, não inferior a 30  $H_z$ , ou seja 0,5 s.

$K$ : Coeficiente de segurança [entre 1,10 a 1,30].

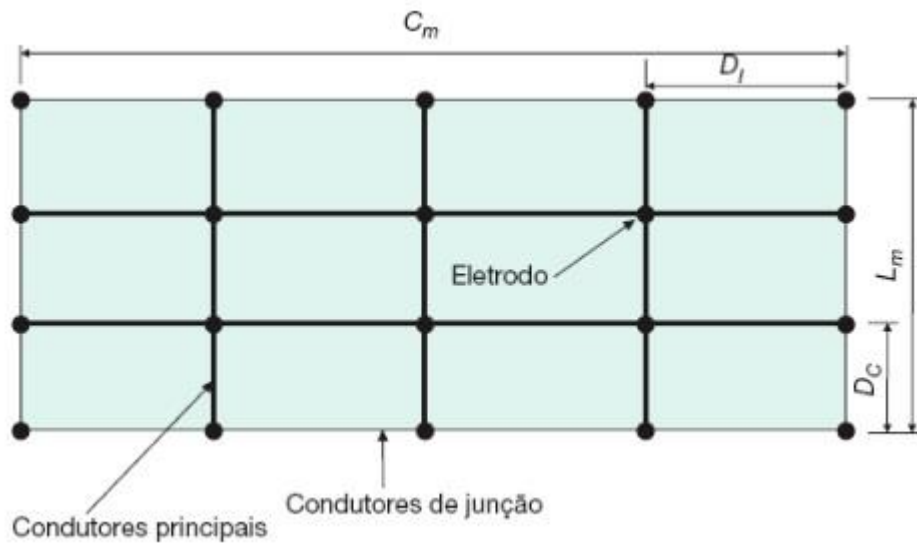
$\beta_c$ : coeficiente que expressa o tipo de condutor.

- $\beta_c = 0,91$ : para fios ou cabos com condutividade de 40%.
- $\beta_c = 0,81$ : para fios ou cabos com condutividade de 30%.

**Passo 5. Projeto inicial da malha de aterramento:**

Baseado na Figura 2.27 será orientada as seguintes etapas para o dimensionamento da malha de aterramento, conforme (MAMEDE FILHO, 2017).

**Figura 2. 27** Geometria da malha de terra com os respectivos eletrodos verticais.



Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.

**5.1. Estimar condutores principais ( $N_{cp}$ ):**

Instalado na direção correspondente da malha de terra, sendo estimado conforme Equação 25. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$N_{cp} = \frac{C_m}{D_l} + 1 \quad [m] \quad (25)$$

Sendo:

$C_m$ : comprimento da malha de terra  $[m]$ .

$D_l$ : distância entre os cabos correspondente à largura da malha de terra  $[m]$ .

### 5.2. Estimar condutores de junção ( $N_{cj}$ ):

Corresponde à largura da malha de terra, descrito na Equação 26. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$N_{cj} = \frac{L_m}{D_c} + 1 \quad [m] \quad (26)$$

Sendo:

$L_m$ : largura da malha de terra  $[m]$ .

$D_c$ : distância entre os cabos correspondente à comprimento da malha de terra  $[m]$ .

Os parâmetros  $D_l$  e  $D_c$  devem estar entre 5% a 10% do comprimento e largura de malha.

### 5.3. Comprimento dos condutores ( $L_{cm}$ ):

Comprimento total dos condutores de malha, em que o fator 1,05 representa o acréscimo de haste a malha de aterramento. Expressa pela Equação 27. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_m \times N_{cj}) + (L_m \times N_{cp})] \quad [m] \quad (27)$$

**Com os valores obtidos nos Passos 5.1, 5.2 e 5.3 deve-se seguir para o Passo 6.1.**

### 5.4. Coeficientes de Ajuste:

Os coeficientes de ajuste são utilizados na simplificação das expressões para condutores e junções (MAMEDE FILHO, 2017)

Para os três fatores que serão apresentados a seguir, deve-se apresentar valores para os condutores principais ( $K_{\square p}$ ) e de junção ( $K_{\square j}$ ). (MAMEDE FILHO, 2017)

#### 5.4.1. Coeficiente de malha ( $K_m$ ):

Corrige a influência da profundidade da malha de aterramento ( $H$ ), diâmetro dos condutores e espaçamento entre eles, consoante a Equação 28. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left( \frac{D^2}{4 \times \pi \times (N - 1) \times H \times D_{ca}} \right) \quad (28)$$

Sendo:

$D$ : espaçamento médio entre os condutores na direção considerada [ $m$ ].

$H$ : profundidade da malha [ $m$ ].

$N$ : número de condutores na direção considerada.

$D_{ca}$ : diâmetro do condutor.

#### 5.4.2. Coeficiente de superfície ( $K_s$ ):

Corrige a influência da profundidade da malha de terra e o espaçamento entre os mesmos, definida por meio da Equação 29. (MAMEDE FILHO, 2017)

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left( \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D + H} + \ln \frac{[0,655 \times (N - 1) - 0,328]}{D} \right) \quad (29)$$

#### 5.4.3. Coeficiente de irregularidade ( $K_i$ ):

Corrige a não uniformidade de distribuição da corrente pela malha. Dada pelas Equações 30 e 31. (MAMEDE FILHO, 2017)

- condutores principais:  $K_{ip} = 0,65 + 0,172 \times N_{cp}$  ▪ (30)

- condutores de junção:  $K_{ij} = 0,65 + 0,172 \times N_{cj}$  (31)

### 5.5. Comprimento mínimo do condutor ( $L_{cmín.}$ ):

Conforme (MAMEDE FILHO, 2017), determinar o comprimento mínimo do condutor a parti da Equação 32.

$$L_{cmín.} = \frac{K_m \times K_i \times \rho_a \times I_{CFT} \times \sqrt{T_f}}{116 + 0,174 \times \rho_s} \quad [m] \quad (32)$$

### 5.6. Verificar a condição do condutor mínimo:

$$L_{cmín.} \leq L_{cm} \quad (33)$$

**Se a condição 5.6 FOR SATISFEITA deve-se seguir para o Passo 6.3.**

**Se a condição 5.6 NÃO FOR SATISFEITA, deve-se refazer os Passos 5.2, 5.3 e 5.4.**

## Passo 6. Potenciais máximos:

### 6.1. Potencial de Passo máximo ( $V_{passomáx.}$ ):

Calcular o potencial de passo máximo através da Equação 20, descrita anteriormente.

### 6.2. Potencial de toque máximo ( $V_{toquemáx.}$ ):

Calcular o potencial de toque máximo através da Equação 22, descrita anteriormente.

**Com os valores obtidos nos Passos 6.1 e 6.2, deve-se seguir para o Passo 7.1**

### 6.3. Potencial de passo existente na periferia da malha ( $V_{passoex.}$ ):

Surge na superfície da malha, quando do máximo defeito fase terra, e é determinado pela Equação 34 (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995):

$$V_{passoex.} = \frac{K_s \times K_i \times \rho_1 \times I_{CFT}}{L_{cm}} \quad [V] \quad (34)$$

**6.4.** Verificar a condição para potencial de passo existente:

$$V_{passoex.} \leq V_{passomáx.}$$

(35)

**Se a condição 6.4 FOR SATISFEITA, deve-se seguir para o Passo 7.5.**

**Se condição 6.4 NÃO FOR SATISFEITA, deve-se retornar ao Passo 5.3 e refazer os passos subsequentes.**

**6.5.** Potencial de toque existente ( $V_{toqueex.}$ ):

Potencial de toque máximo encontrado dentro de uma sub malha de terra, quando ocorre o máximo defeito fase terra, expresso pela Equação 36. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995):

$$V_{toqueex.} = \frac{K_m \times K_i \times \rho_1 \times I_{CFT}}{L_{cm}}$$

(36)

**6.6.** Verificar a condição para potencial de toque existente, conforme a Equação 37:

$$V_{toqueex.} \leq V_{toquemáx.}$$

(37)

**Se a condição 6.6 FOR SATISFEITA, o processo está finalizado e os parâmetros obtidos serão utilizados na execução do projeto.**

**Se condição 6.6 NÃO FOR SATISFEITA, deve-se retornar ao Passo 5.3 e refazer os passos subsequentes.**

**Passo 7. Resistência da malha de terra:**

**7.1** Determinar a resistência da malha ( $R_{malha}$ ) de terra pela fórmula de Sverak, descrita na Equação 38.

$$R_{malha} = \rho_a \times \left[ \frac{1}{L_{cm}} + \frac{1}{\sqrt{20 \times A_{malha}}} \times \left( 1 + \frac{1}{1 + H \times \sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right] \quad [\Omega]$$

(38)

Sendo:

$A_{malha}$ : área ocupada pela malha, dada pela Equação 39.

$$A_{malha} = C_m \times L_m \quad [m^2]$$

(39)

### 7.2 Potencial de toque máximo da malha ( $V_{toque\ máx.\ malha}$ ):

Será dado através da Equação 40.

$$V_{toque\ máx.\ malha} = R_{malha} \times I_{malha} \quad [\Omega]$$

(40)

### 7.3 Verificar a condição de potencial de toque máximo em relação ao infinito:

$$V_{toque\ máx.\ malha} \leq V_{toquemáx.} \quad [V]$$

(41)

**Se a condição 7.3 FOR SATISFEITA, o processo está finalizado e os parâmetros obtidos serão utilizados na execução do projeto.**

**Se a condição NÃO for aceita, deve-se retornar ao Passo 5.4 e realizar os procedimentos subsequentes.**

Conforme a metodologia apresentada, o Apêndice B sintetiza os procedimentos necessários para dimensionar uma malha de terra para subestação de média tensão.

## 2.7 Tratamento do solo

No projeto de aterramento, algumas instalações necessitam de uma baixa resistência, mesmo que com uma área pequena para dimensionamento da malha e estando localizada em um terreno que apresente alta resistividade, situação que dificultará a redução da resistência de malha. (LEITE; PEREIRA FILHO,2007)



Nestes casos em que a diminuição da resistência de malha se torna inviável com a adição de eletrodos e componentes no sistema, é recomendado o tratamento do solo, que consiste em técnicas para reduzir a resistividade na região analisada.

O processo de tratamento do solo pode ocorrer utilizando produtos químicos, de origem natural, ou produzidos laboratorialmente, ou através da estrutura de ferragens e concreto da própria instalação.

### **2.7.1 Tratamento químico**

O tratamento químico é um procedimento onde são utilizados materiais, que elevem a condutividade do terreno através da modificação mineral, que resulta no aumento do diâmetro do eletrodo e conseqüentemente na redução da resistência, conforme (LEITE; PEREIRA FILHO,2007).

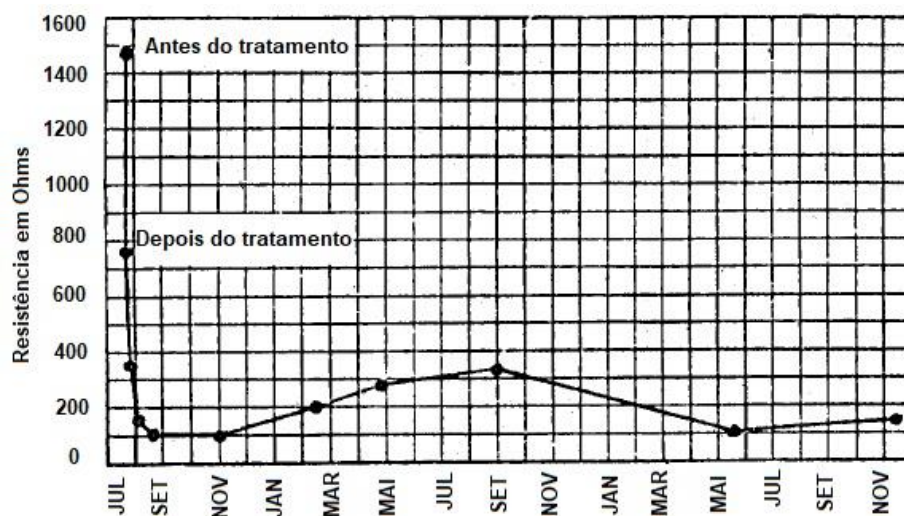
Atualmente, a técnica mais utilizada é por meio de uma mistura de sais minerais, que combinados entre si e na presença de água, formam o Gel, produto largamente utilizado por profissionais da área. Segundo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995) os materiais devem apresentar as seguintes características:

- Não serem tóxicos
- Baixa resistividade.
- Boa higroscopia.
- Proporcionarem estabilidade química ao solo.
- Baixo fator de corrosão.

O tratamento não pode ser realizado com sais solúveis, como o sal de cozinha, pois com o tempo o mineral não terá efeito, além de se tornar danoso ao eletrodo devido a sua característica corrosiva. (LEITE; PEREIRA FILHO,2007)

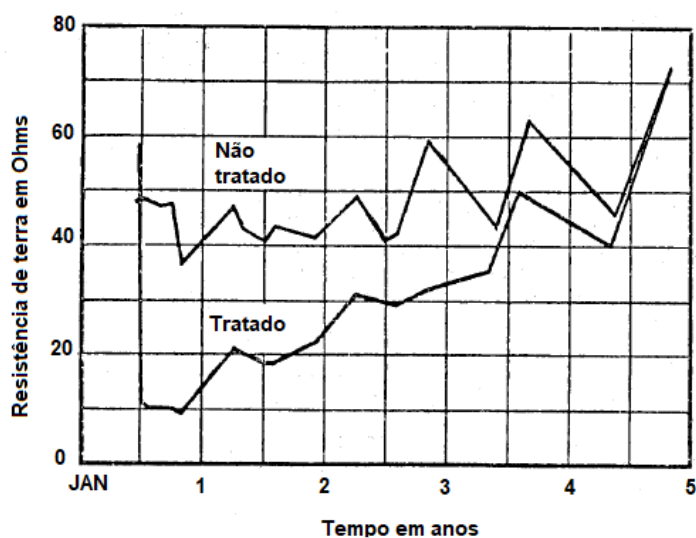
Em geral o tratamento químico do solo garante reduções expressivas nas resistividades dos locais aplicados, retratados na Figura 2.28, devido ao produto químico ser higroscópico e manter a água retida por um longo período de tempo. (LEITE; PEREIRA FILHO,2007)

**Figura 2. 28** Resistência de terra reduzida pelo tratamento químico.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

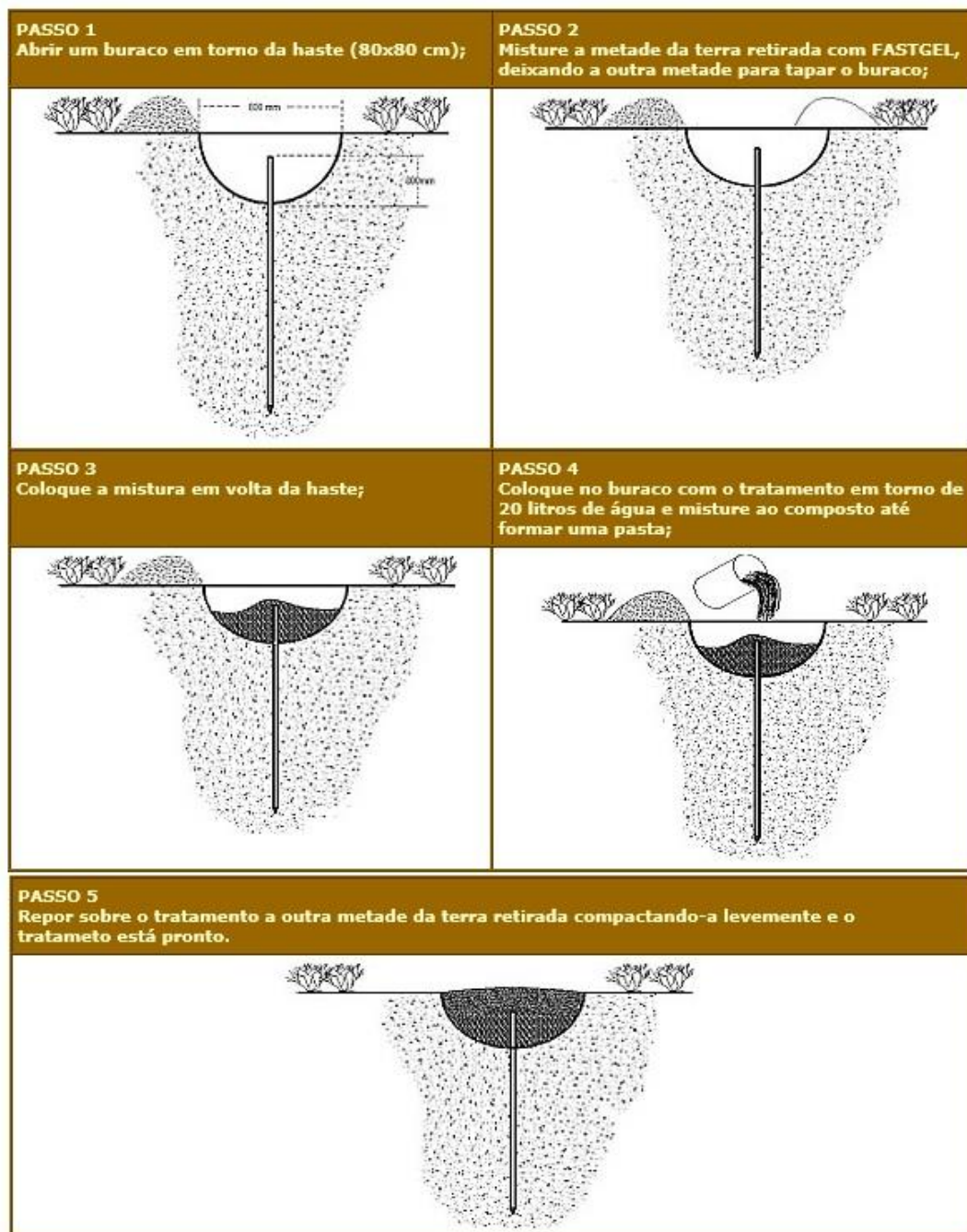
**Figura 2. 29** Variação da resistência de terra em solos tratados e não tratados, com o tempo.



Fonte: KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995

O procedimento de aplicação do gel é ilustrado na Figura 2.30, e deve ser adotado para cada haste individualmente.

**Figura 2. 30** Procedimentos para tratamento químico do solo.



Fonte: FASTWELD, 2018.

### **2.7.2 Tratamento físico do solo através da utilização da fundação no projeto de aterramento**

Uma alternativa que viabiliza técnica e economicamente o projeto de aterramento é a utilização da fundação da instalação como eletrodo de terra. Este

procedimento que foi utilizado para terrenos extremamente secos, hoje é adotado pela maioria das construções de fim comercial e residencial. (COTRIM, 2009)

O concreto, devido as suas características alcalinas, sendo poroso e higroscópico, quando enterrado para composição da estrutura juntamente com as ferragens, apresenta resistividade entre 30 e 90 [ $\Omega.m$ ]. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

As ferragens da fundação aplicadas a sistema de aterramentos são denominadas eletrodos naturais. Os elementos metálicos da fundação não entram em contato direto com o solo, mas com o concreto. (COTRIM, 2009)

Devido a composição da estrutura metálica e das propriedades do concreto em reter calor e umidade, a resistência de aterramento da malha tende a ser mais baixa se comparada com outros tipos de configurações tradicionais. (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007)

Segundo (COTRIM, 2009), a Equação 42 é comumente utilizada por profissionais da área, para determinar a resistência de aterramento em sistemas que utilizem a fundação como eletrodo.

$$R_m = \frac{\rho_c}{1,57\pi^3\sqrt{V}} \quad [\Omega] \quad (42)$$

Sendo:

$\rho_c$ : Resistividade do solo após a aplicação do concreto (variando entre 30 e 90 [ $\Omega.m$ ]).

$V$ : Volume da fundação em concreto [ $m^3$ ].

A utilização da fundação garante baixos valores de resistência, baixa interferência por variações climáticas, alta resistência mecânica e corrosiva além de não requerer manutenção e não gerar custo de material, pois será um item estrutural da edificação, é claro, se a instalação estiver na fase de construção. (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007)

### 3 MEDIÇÕES EM CAMPO E PROCEDIMENTOS

Visando aplicar uma metodologia adequada para o dimensionamento da malha de terra, este capítulo apresentara os locais sugeridos para implantação da subestação, instrumentação, detalhamento da medição e *software* utilizado.

#### 3.1 Característica do solo na região do Distrito Federal

Brasília e as demais cidades satélites que compõe o Distrito Federal (DF), fazem parte do planalto central do Brasil. A região é totalmente ocupada pelo Cerrado, que é o segundo maior bioma da América do Sul. (GDF, 2018)

A cidade possui clima tropical, que apresenta dois períodos característicos. Primeiro, com chuvas geralmente fortes e de curta duração, de outubro ao início de maio. Segundo, época de seca entre maio e setembro, com baixa umidade e dias mais quentes. (GDF, 2018)

Devido a sua localização no Cerrado, o solo do DF é classificado como latossolo, característico desse bioma. Apresenta uma coloração variando do vermelho para o amarelo, baixa fertilidade, exceto quando originados de rochas mais ricas em minerais essenciais às plantas. (EMBRAPA, 1978)

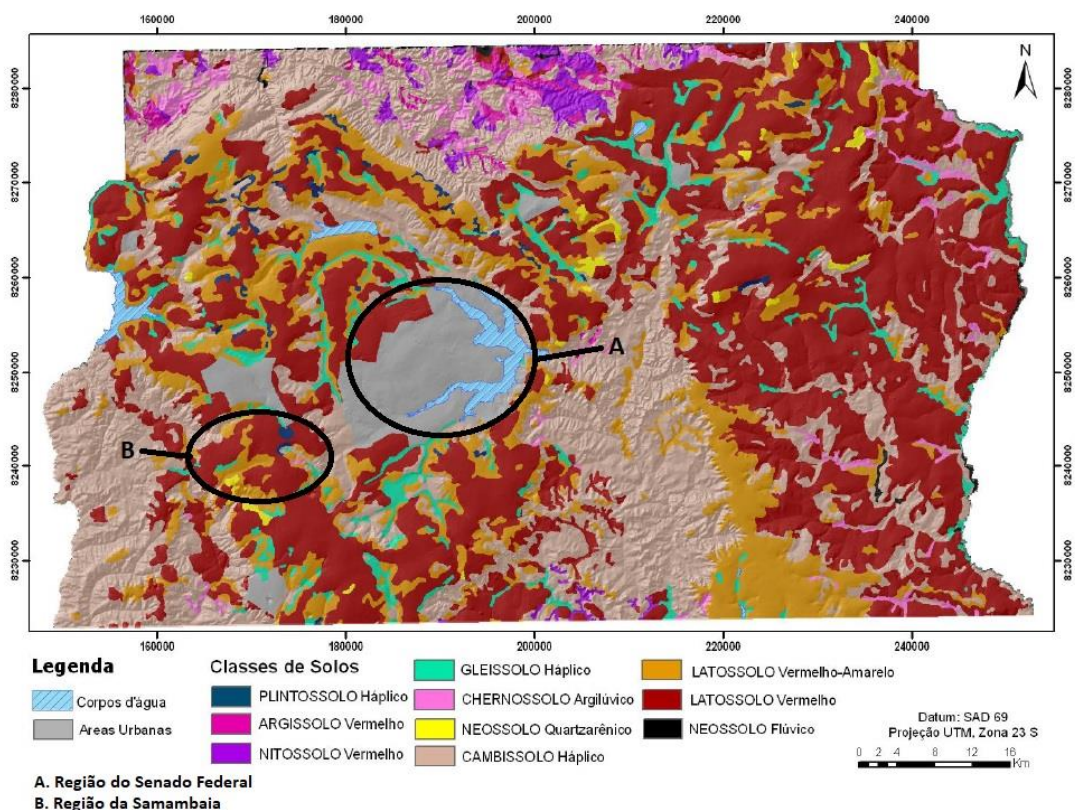
O processo de formação dos latossolos é a latossonolização, que consiste na remoção da sílica e das bases do perfil, como cálcio, potássio, magnésio dentre outros, promovendo um enriquecimento relativo de óxidos de ferro e de alumínio. (SOUSA; LOBATO, 2018)

A latossonolização provoca o empobrecimento do solo, tornando-o carente de nutrientes, mais ácido e propiciando aspecto maciço poroso; de estrutura granular muito pequena, macios quando secos e altamente friáveis quando úmidos. (SOUSA; LOBATO, 2018)

Os latossolos podem apresentar aspectos de solos argilosos até solos arenosos, dependendo da estruturação química, composição mineral e de fatores externos ao solo, como a utilização do mesmo.

Segundo (EMBRAPA, 2006), aproximadamente mais de 50% do solo no DF é classificado com um dos tipos de latossolo. A Figura 3.1 traz o mapeamento do solo na cidade.

**Figura 3. 1** Mapa do solo no Distrito Federal.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (EMBRAPA, 2006)

### 3.2 Locais de Medição

Consoante ao objetivo do trabalho, em fazer uma comparação da influência do solo no dimensionamento da malha de terra em uma subestação comercial, os locais escolhidos foram baseados nos seguintes fatores:

- Característica de solo.
- Área com dimensões suficientes.
- Viabilidade logística para as medições.
- Destinação futura para instalação residencial, comercial ou industrial.



Buscando atender os fatores acima, os terrenos escolhidos estão localizados no Senado Federal (Plano Piloto) e Samambaia, regiões administrativas que compõe o DF.

### **3.2.1 Terreno 1: Senado Federal**

Como primeiro terreno em estudo, foi escolhido o jardim externo no Senado Federal. As medidas de resistência do solo foram realizadas pela IPT ENGENHARIA e fornecidas para o desenvolvimento deste trabalho.

O Senado Federal não tem destinação residencial, comercial ou industrial, contudo, instalações possuem alta carga. Apesar de todas as restrições decorrentes do tombamento, pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), a instalação de uma nova subestação para atender à crescente demanda energética do parlamento, será considerada para construção deste trabalho.

A área escolhida no Senado Federal possui dimensões suficientes, para levantamento dos dados necessários, para aterramento de uma subestação. A Figura 3.2 apresenta o local e os Anexos F e Apêndice C retratam o mapa e imagens do terreno.

**Figura 3. 2** Primeiro Terreno: Senado Federal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### **3.2.2 Terreno 2: Samambaia:**

Samambaia é uma das regiões administrativas que mais cresceram nos últimos anos, sendo uma das regiões mais populosa do Distrito Federal. O solo é o latossolo vermelho escuro, textura média argilosa, características correspondentes a solos do Cerrado. (SAMAMBAIA, 2009)

Os locais que outrora eram ocupados por campos de futebol comunitários, espaços sem utilidades e/ou ociosos, estão sendo adquiridos por construtoras para fins comerciais e residenciais.

A construção civil impulsionou mudanças na economia, com o mercado imobiliário aquecido, a cidade vem sendo tomada por grandes construções verticais, se tornando um dos maiores canteiros de obra no DF.

Diante do panorama da cidade, o segundo local está localizado na Quadra Comercial QS 301. O terreno possui dimensões suficientes para a realização das medições.

Sua área possibilita tanto uma destinação comercial e/ou residencial, dada a sua localização na cidade. A Figura 3.3 apresenta o local escolhido e o Anexos G e Apêndice D trazem o mapa e imagens com maior detalhamento do terreno.

**Figura 3. 3** Segundo terreno: Samambaia.



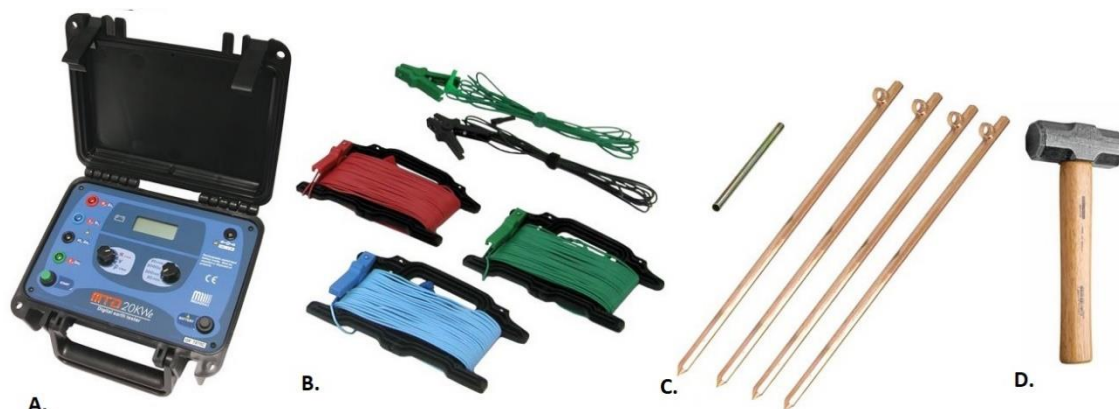
Fonte: Elaborado pelo autor.



### 3.3 Instrumentação de medição

Para medição da resistência nos terrenos escolhidos, foram utilizados os seguintes equipamentos e ferramentas, descritos abaixo e ilustrados na Figura 3.4 e mais detalhadamente no Apêndice E.

**Figura 3. 4** Instrumento e ferramentas para medição.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (MEGABRAS, 2017).

#### **A. Terrômetro:**

Foi utilizado neste trabalho o terrômetro digital MTD 20 KWe, fabricado pela Megabras. Conforme relato no item 2.3.3, este tipo de Megger realiza a medição da resistência do solo.

As principais aplicações deste terrômetro são a verificação da resistência de aterramento de prédios, instalações industriais, hospitalares, domiciliares, para-raios, antenas, subestações e etc. (MEGABRAS, 2017)

Além da medição da resistência do solo, o terrômetro digital MTD 20 KWe pode ser utilizado como voltímetro. A medição da resistividade permite avaliar a estratificação do terreno para otimizar os sistemas de aterramento. (MEGABRAS, 2017)

O equipamento possui uma bateria, que permite sua utilização em campo sem a necessidade de fontes externas de alimentação. Outra característica relevante, é o sinal sonoro, que adverte o operador caso exista alguma interferência que possa

comprometer a medição, por exemplo, a má conexão do eletrodo na haste de medição.

Na aquisição do terrômetro digital MTD 20 KWe, o comprador pode adquirir apenas o terrômetro ou o kit completo que vem com os acessórios ilustrados na Figura 3.4. (MEGABRAS, 2017).

### B. Cabeamento e eletrodos:

O cabeamento é utilizado no terrômetro digital MTD 20 KWe para conectar as saídas e entradas do equipamento as estacas de medição, por meio dos conectores do tipo jacaré.

Conforme a configuração de Wenner, o terrômetro utilizado apresenta os bornes H e E os eletrodos injetores de corrente, e nos bornes S e ES os eletrodos de potencial.

De acordo com a Figura 2.20 é possível identificar no terrômetro digital MTD 20 KWe, a mesma configuração de Wenner está retratada na Figura 3.5.

**Figura 3. 5** Bornes conforme arranjo de Wenner no terrômetro digital MTD 20 KWe.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### C. Estacas para medição:

As estacas são elementos pontiagudos compostos de um mesmo material, geralmente do tipo Copperweld ou Cadweld, fincados a uma mesma profundidade do

solo e separado por distâncias iguais. Nas medições realizadas foram utilizadas as estacas de 50 centímetros do Tipo Cadweld, cravadas a uma profundidade de 30 centímetros.

#### **D. Marreta:**

Foi utilizada a marreta para fixar as estacas de medição no solo, na profundidade estabelecida por norma.

### **3.4 Processo de medição em campo**

Para a realização das medições, adotou-se o método de Wenner, conforme capítulo 2. Abaixo são descritas as etapas para obtenção da resistência do solo, utilizando o terrômetro digital MTD 20 KWe.

#### **3.4.1 Determinação da resistência do solo**

No projeto para uma malha de terra, é necessário a escolha do terreno em que se deseja instalar a subestação. Para este trabalho, os terrenos escolhidos foram apresentados no item 3.1.

Com os terrenos definidos, foi delimitado o local que abrigará a subestação. Em seguida, serão definidos os respectivos espaçamentos nos eixos de medição considerados, consoante ao estabelecido pela norma (ABNT, 2012).

Após levantamento das resistências, procede-se para cálculo da resistividade aparente do solo através da estratificação. Se as resistividades calculadas apresentarem desvio superiores a 50%, conforme item 2.3.3.3, as amostras são descartadas, sendo necessário realizar novas medições.

Se os desvios calculados estiverem na faixa estabelecida pela norma vigente o processo está finalizado. O Apêndice F retrata as etapas para obtenção das resistências do solo, de acordo com os espaçamentos e eixos escolhidos.

### **3.4.2 Determinação dos eixos de medição**

Dependendo do tipo de terreno e da configuração do solo, é comum que a etapa de medição seja refeita diversas vezes, devido aos erros encontrados entre as amostras mensuradas.

Determinar os eixos de medição é de suma importância para o resultado final das resistências do solo medida. O projetista da malha de terra, deve se atentar para a geometria do local onde será a futura instalação, baseando o seu levantamento na (ABNT, 2012) e (ABNT, 2013).

#### **Terreno 1: Senado Federal**

A IPT ENGENHARIA, empresa que forneceu as medidas de resistência do jardim no Senado Federal, realizou as medições no terreno com área de aproximadamente 70 metros por 70 metros, utilizando 4 eixos, defasados de 45° e com um ponto central em comum ilustrado na Figura 3.6.

#### **Terreno 2: Samambaia**

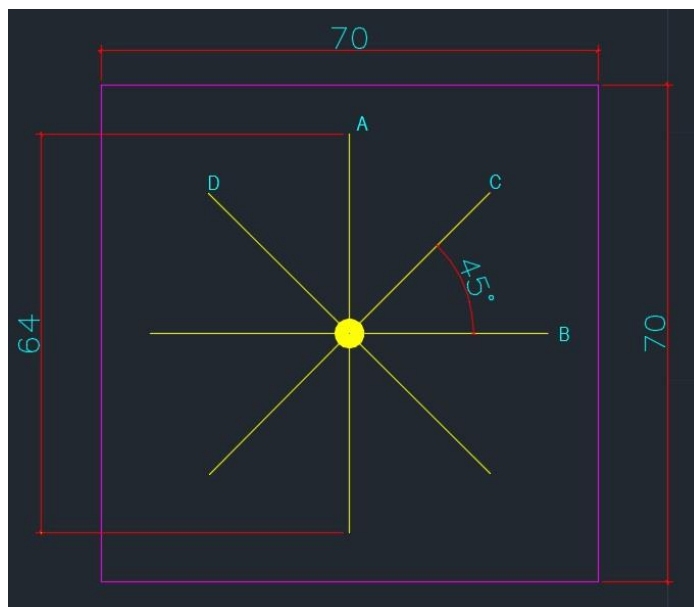
Para realização das medições no terreno da Samambaia foram utilizados 6 eixos com uma defasagem de aproximadamente 30° entre eles, em uma área de aproximadamente 70 metros por 70 metros. A Figura 3.7 representa o croqui dos eixos utilizados para levantamento das resistências do terreno.

Na Figuras 3.6 e 3.7, os eixos escolhidos possuem um ponto em comum, a técnica é utilizada para reduzir variações entre as medidas realizadas, partindo da referência de um ponto em comum para todos os eixos.

### **3.4.3 Determinação dos espaçamentos**

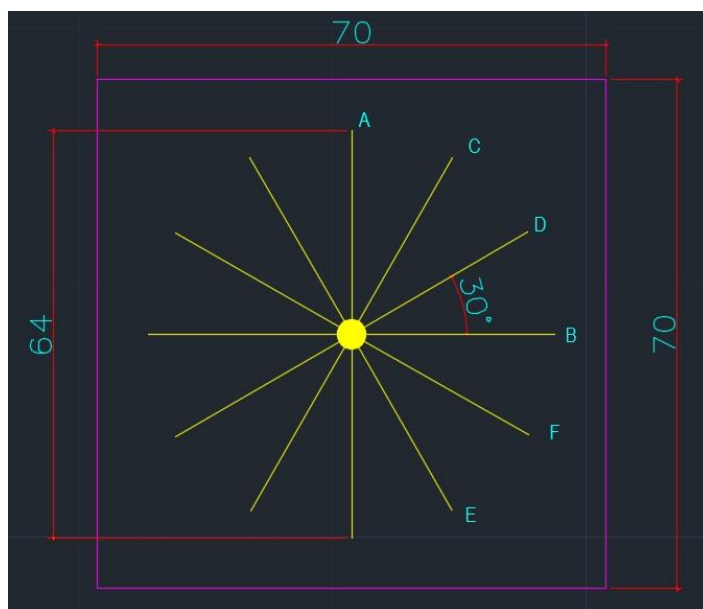
Os espaçamentos foram definidos de acordo com as sugestões da (ABNT, 2012) consoantes a Tabela 2.6. Dada as dimensões da subestação sugeridas no projeto de 14,40 metros de largura por 9,50 metros de comprimento, foi utilizado para os dois terrenos em análise os espaçamentos de 1, 2, 4, 8 e 16 metros, ilustrados na Figura 3.8.

**Figura 3. 6** Croqui dos eixos utilizados para medição das resistências no Senado Federal.



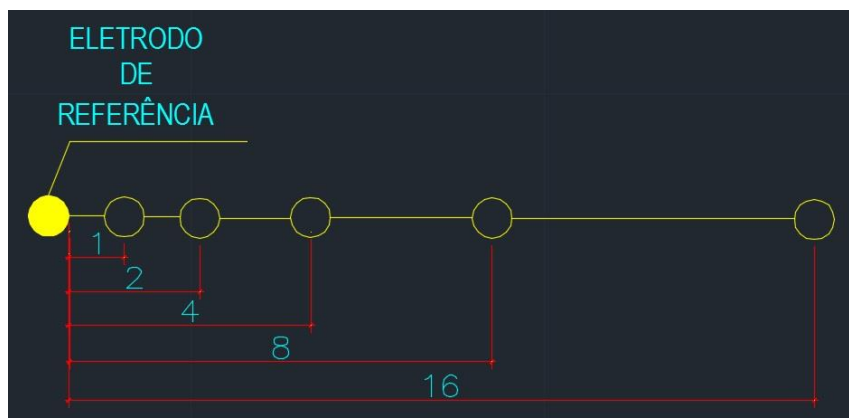
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 3. 7** Croqui dos eixos utilizados para medição das resistências na Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 3. 8** Croqui dos espaçamentos utilizados para medição das resistências.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5 Resultados obtidos

Os resultados obtidos foram encontrados de acordo com os procedimentos descritos do item anterior. As estacas de medição foram inseridas a uma profundidade ( $p$ ) de 30 centímetros. Apesar de seguir o mesmo procedimento, as medições foram realizadas em períodos e condições climáticas diferentes.

Vale ressaltar que a resistividade do solo está sujeita a variações provenientes de condições ambientais, climáticas e externas, o que altera diretamente o valor da resistência.

#### 3.5.1 Medição terreno 1: Senado Federal

O levantamento da resistência no jardim localizado do Senado Federal, realizado pela IPT ENGENHARIA no dia 20/09/2017, durante a manhã e no período de seca no DF.

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instituição responsável pelo levantamento de informações concernentes ao tempo e clima no país. Disponibiliza acesso aos dados meteorológicos por meio das suas estações espalhadas pelo Brasil.

Devido as medições serem realizadas no ano de 2017, os parâmetros de temperatura, umidade e índice pluviométrico foram levantados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), localizado no portal do INMET e detalhados na Tabela 3.1.

A partir das medições nos 4 eixos defasados de 45° e espaçados em até 16 metros, foram encontrados os seguintes resultados retratados na Tabela 3.2.

**Tabela 3. 1** Dados climáticos durante a semana de medição no terreno do Senado Federal.

Data	Hora	Temperatura (°C)		Umidade (%)	Chuva
	UTC	Máx.	Mín.	Méd.	(mm)
13/09/2017	0:00 as 12:00	27,8	17,1	41,5	0.0
14/09/2017	0:00 as 12:00	28,6	17,9	38,5	0.0
15/09/2017	0:00 as 12:00	28,4	18,9	36,25	0.0
16/09/2017	0:00 as 12:00	28	17,1	29,75	0.0
17/09/2017	0:00 as 12:00	27,6	16,4	37,25	0.0
18/09/2017	0:00 as 12:00	29,1	17,2	35,75	0.0
19/09/2017	0:00 as 12:00	28,9	17,4	35,25	0.0
20/09/2017	0:00 as 12:00	29,3	17,5	34,75	0.0
<b>TOTAL</b>		<b>28,5</b>	<b>17,4</b>	<b>36,1</b>	<b>0,0</b>

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (BDMEP, 2018).

**Tabela 3. 2** Valores de resistência no terreno do Senado Federal.

Espaçamento a [m]	Resistencia elétrica medida [ $\Omega$ ]					
	A	B	C	D	E	F
1	15	14,66	18,22	14,49	-	-
2	8,66	11,36	8,38	7,79	-	-
4	4,83	7,29	4,22	4,74	-	-
8	2,85	4,18	2,43	2,55	-	-
16	1,92	2,30	1,35	1,09	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.5.2 Medição terreno 2- Samambaia

As aferições no terreno da Samambaia ocorreram no dia 29/09/2018, de modo semelhante ao terreno 1, pela manhã e na época de seca no Distrito Federal. Durante as medições, o INMET registrou os parâmetros meteorológicos apresentados na Tabela 3.3.

Os valores de resistência encontrados nos 6 eixos defasados de 30° e espaçados em até 16 metros, estão compilados na Tabela 3.4.

**Tabela 3. 3** Dados climáticos durante a semana de medição no terreno da Samambaia.

Data	Hora	Temperatura (°C)		Umidade (%)	Chuva
	UTC	Máx.	Mín.	Méd.	(mm)
22/09/2018	0:00 as 12:00	24,3	22,8	84,4	0.0
23/09/2018	0:00 as 12:00	24,8	22,7	68,4	0.0
24/09/2018	0:00 as 12:00	27,8	25,5	62,0	0.0
25/09/2018	0:00 as 12:00	27,3	25,3	65,9	0.0
26/09/2018	0:00 as 12:00	27,7	25,7	45,8	0.0
27/09/2018	0:00 as 12:00	27,4	24,0	45,6	0.0
28/09/2018	0:00 as 12:00	25,4	22,9	49,3	0.0
29/09/2018	0:00 as 12:00	28,4	26,5	62,7	0.0
TOTAL		26,6	24,4	60,5	0.0

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (INMET, 2018).

**Tabela 3. 4** Valores de resistência no terreno da Samambaia.

Espaçamento a [m]	Resistencia elétrica medida [ $\Omega$ ]					
	A	B	C	D	E	F
1	680	1037	1022	1126	908	905
2	762	803	876	816	716	720
4	348	481	435	484	363	358
8	45,90	341	129,60	123,50	70,50	86,90
16	24,70	19,23	25	20,90	89,40	63

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.6 Apresentação do Software TecAt Plus

Com 25 anos no mercado, o TecAt Plus é um *software* que possibilita economia de tempo no dimensionamento de projetos de aterramento, possibilitando maior segurança e confiabilidade, garantindo viabilidade técnica e econômica.



### **3.6.1 História do TecAt Plus**

Em meados de 1989 um grupo de engenheiros consultores, verificaram que as soluções existentes para projetos de aterramento eram incompletas e formalmente erradas. (OFFICINA, 2016)

Os métodos gráficos e manuais utilizados na época, além de demandarem muito tempo e serem caros, não garantiam a precisão dos valores obtidos. (OFFICINA, 2016)

A equipe de engenheiros consultores iniciaram o projeto de um *software* que atendesse a demanda do mercado, logo foi criado o TecAt. Desenvolvido e distribuído pela Officina de Mydia no Brasil e comercializado internacionalmente pela Volts and Bolts. (OFFICINA, 2016)

### **3.6.2 Características Gerais**

O TecAt é baseado nas principais normas vigentes internacional e nacionalmente sobre aterramento, como a IEEE, Std 80 e as NBR's 7117 e 5419. (OFFICINA, 2016)

Atualmente o *software* possibilita ao projetista realizar a estratificação do solo em até 4 camadas, com 3 espaçamentos para 2 camadas e 5 espaçamentos para 3 ou 4 camadas, utilizando os métodos de Wenner ou Schumblerg. (OFFICINA, 2016)

No dimensionamento da malha de aterramento, o TecAt calcula a resistência de malha para qualquer geometria, eletrodos e conexões escolhidas. Fornece um banco de materiais que pode ser editado para cabos, hastes, conexões e brita, permitindo realizar comparações de custo, recursos e tempo do projeto.

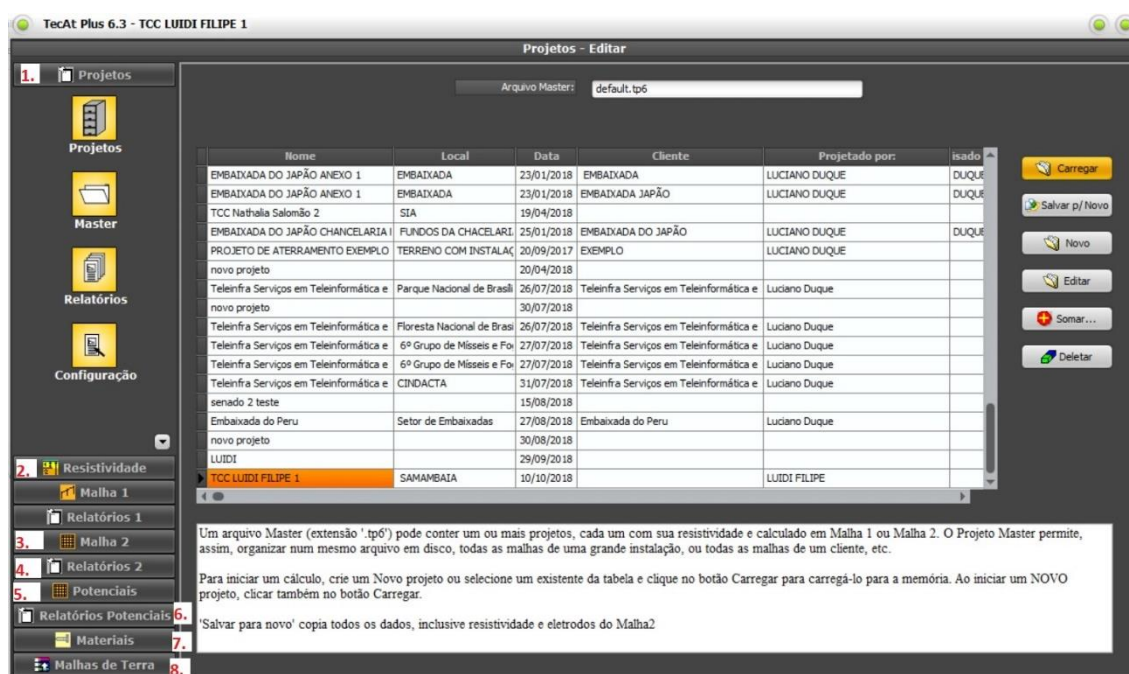
Além da análise e dimensionamento de malhas de terra, o TecAt Plus calcula os potenciais de passo, toque e superfície em até 4 camadas, através do mapeamento dos componentes da malha estimada, possibilitando ao projetista verificar os locais e níveis mais críticos de potencial, no interior ou periferia do sistema de aterramento.

### 3.6.3 Ferramentas no TecAt Plus 6.3 para dimensionamento da malha de terra para subestação

O TecAt Plus apresenta na sua janela principal as ferramentas que serão utilizadas no dimensionamento de uma malha de terra para subestação, ilustrado na Figura 3.9.

A seguir serão detalhadas as ferramentas do *software* e etapas para o dimensionamento da malha de aterramento para subestação.

**Figura 3. 9** Menu de ferramentas do TecAT Plus 6.3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### Passo 1. Projeto:

Seção onde será criado novos projetos, iniciados projetos em execução ou editar projetos já finalizados. A Figura 3.10 retrata a página principal do *software*.

#### Passo 2. Resistividade:

Seção onde será realizado a estratificação do solo, de acordo com o método de levantamento das resistências, procedimento de cálculo definido e número de camadas escolhido. A Figura 3.10 detalha estes processos.

## 2.1. Configurações:

Nesta aba, através das opções, será realizado a estratificação do solo, conforme os parâmetros obtidos em campo. Sendo necessário:

### 2.1.1. Configuração de Medições:

Define os parâmetros base, instrumento e técnica utilizada no processo de medição da resistência do solo.

### 2.1.2. Configuração de Cálculo:

Define o número de camadas para estratificação e os parâmetros matemáticos, para os cálculos realizados pelo *software*.

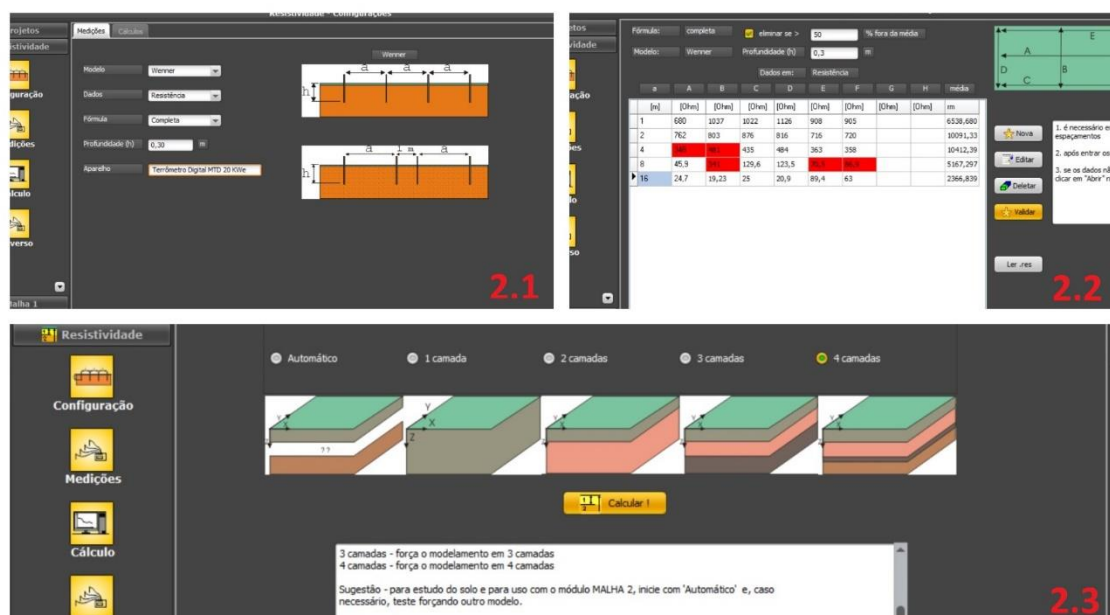
## 2.2. Medições:

As resistências medidas em campo, serão inseridas conforme os espaçamentos e distância utilizados. Após inserida os valores serão validados.

## 2.3. Cálculo:

Esta aba permite escolher a quantidade de camadas que o terreno será estratificado.

**Figura 3. 10** Passo 2 - Resistividade no TecAt Plus 6.3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com dos valores de resistência inseridos no *software*, é gerado um gráfico do tipo log-log, ilustrado na Figura 3.11, que apresentará os valores de resistividade.

De acordo com (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007) criadores do TecAt, para assegurar a precisão dos resultados no processo de estratificação, o *software* utiliza dois tipos de desvio para julgar os valores de resistividade que são:

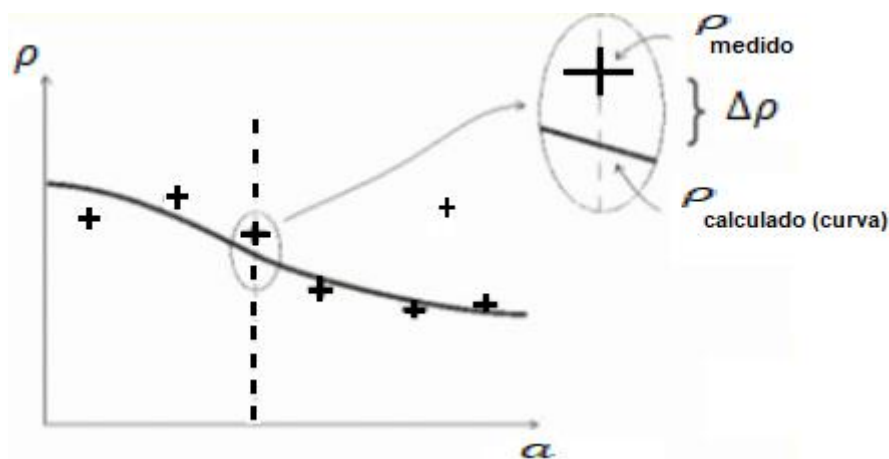
1. Limite de desvio para um ponto.
2. Limite de desvio *root mean square* (RMS) ou desvio médio quadrático.

O primeiro parâmetro é referente à diferença de precisão entre o valor medido e o valor calculado, exibido na Figura 3.11.

É necessário definir a precisão exigida para cada medição, com base nos fatores climáticos e precisão dos instrumentos de medição. Em geral, utiliza-se um valor de 30% para cada ponto calculado em relação ao medido em campo, conforme Expressão 43. (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007)

Se ocorrer repetição nos desvios no decorrer da curva de resistividade, a estratificação é reprovada, sendo necessário a realização de um novo procedimento com os parâmetros revisados e/ou atualizados. (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007)

**Figura 3. 11** Limite de desvio ponto um ponto.



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007).

$$\frac{|\rho_{calc.} - \rho_{méd.}|}{\rho_{méd.}} \leq 0,3$$

Sendo:

$\rho_{calc.}$ : Resistividade calculada [ $\Omega.m$ ].

$\rho_{méd.}$ : Resistividade calculada [ $\Omega.m$ ].

O segundo parâmetro é o desvio RMS, calculado por meio de um conjunto de medidas individuais e o valor que este conjunto se desvia da medida padrão, conforme Expressão 44. (LEITE; PEREIRA FILHO,2007)

O TecAt Plus 6.3 trabalha com uma margem do desvio RMS menor que 15%. Se o desvio for superior a 15%, os valores dos parâmetros iniciais devem ser revistos e refeita uma nova estratificação. (LEITE; PEREIRA FILHO,2007)

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}{n}} \leq 15\%$$

(44)

Sendo:

$E_x$ : Erro no ponto x [%].

$n$ : Número de pontos.

#### **OBSERVAÇÃO 1 - Inverso:**

Função utilizada para realizar a comparação entre o valor calculado manualmente e o valor estimado através do TecAt Plus 6.3. Como todos os parâmetros básicos para a concepção do projeto estão sendo executados no *software*, esta ferramenta não será utilizada.

#### **OBSERVAÇÃO 2 - Malha 1 e Relatórios 1:**

O TecAt Plus 6.3 possui as ferramentas Malha 1 e Relatórios 1, que possuem o objetivo de dimensionar até 21 malhas com resistência, custo e tempo de obra baseado em geometrias básicas, no solo de até 2 camadas.

Essas duas ferramentas no TecAt são utilizadas no dimensionamento de projetos simples e não fornecem o cálculo dos potenciais referentes a malha proposta.

Devido à necessidade de se utilizar uma estratificação com maior precisão e determinar os potenciais, estas duas ferramentas não serão utilizadas no dimensionamento da malha de terra para a subestação proposta.

### **Passo 3. Malha 2:**

Seção onde será realizado o dimensionamento da malha de terra, para solo de 2 a 4 camadas. Esta opção permite a escolha dos condutores, conectores e hastes, que poderão ser de diversas configurações ilustrados na Figura 3.12.

Para auxiliar na concepção do projeto, o TecAt Plus oferece a opção dos Wizards que são geradores de malha, com uma lista padrão de materiais integrantes do sistema.

#### **3.1. Wizards:**

Permite ao projetista definir a estrutura da malha de terra, oferecendo arranjos pré-definidos como retângulos, linhas, circular ou triangular. Além de facilitar o dimensionamento do projeto, os Wizards reduzem os erros recorrentes a geometria, tempo de execução e proporcionam maior viabilidade técnica e econômica.

##### **3.1.1 Wizards Configuração:**

Define a estrutura da malha, os tipos de eletrodos, cabos e conexões que serão utilizadas no aterramento.

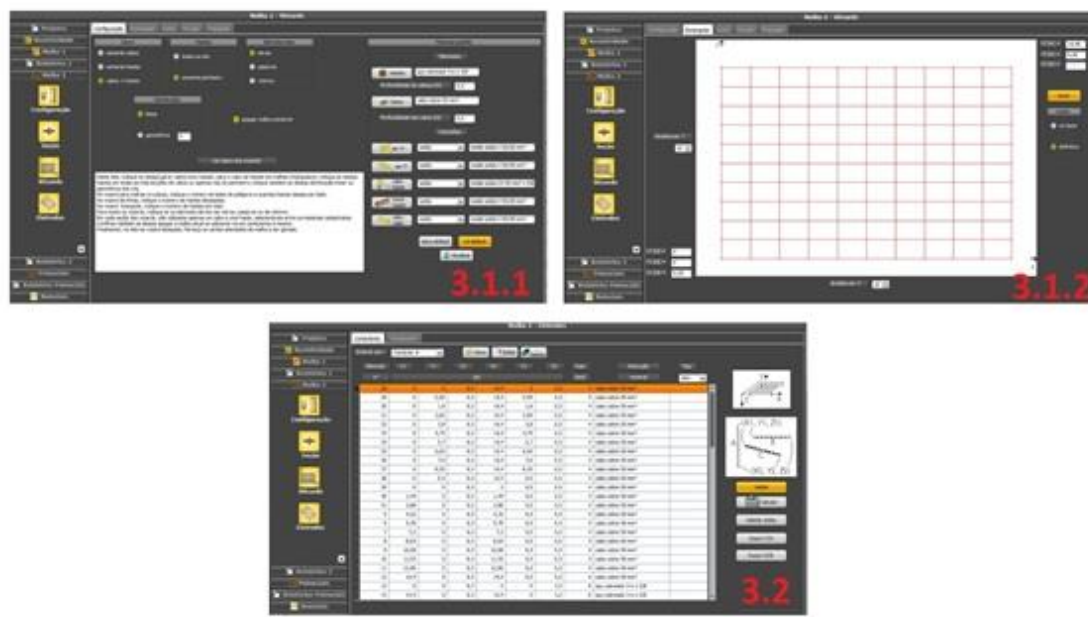
##### **3.1.2 Wizards Retangular:**

Define a profundidade em que os elementos serão enterrados no solo, o posicionamento e dimensões da malha. Os espaçamentos entre os cabos nos eixos X e Y, são chamados de *mesh*.

#### **3.2. Eletrodos:**

Aba que apresenta os eletrodos, conexões e cabos a serem utilizados no projeto, consoante a malha dimensionada no Passo 3.1. Os elementos sugeridos podem ser alterados. Após validado os resultados, é possível calcular a resistência de malha.

**Figura 3. 12** Passo 3 - Malha 2 no TecAt Plus 6.3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **Passo 4. Relatórios 2:**

Seção que apresenta os resultados decorrentes da determinação da malha no item anterior. Através de gráficos, planilhas e relatórios, os elementos que irão compor o sistema de aterramento como: eletrodos e conexões, custos para execução e o valor final da resistência de malha.

#### **Passo 5. Potenciais:**

Seção onde será determinado os limites de potencial estabelecidos por norma, de acordo com a malha dimensionada no Passo 3. Fornecendo gráficos 2D e 3D dos resultados, retratados na Figura 3.13.

De acordo com (LEITE; PEREIRA FILHO, 2007), no TecAt Plus 6.3 os potenciais de Toque e Passo são determinados pelas Equações 45 e 46.

$$E_{t70} = \frac{0,157[1000 - 1,5C_s(h_s, k)\rho_s]}{\sqrt{t_s}}$$

(45)

$$E_{s70} = \frac{0,157[1000 - 6C_s(h_s, k)\rho_s]}{\sqrt{t_s}}$$

(46)

Sendo:

$E_{t70}$ : Potencial admissível de toque para 70 kgf [V].

$E_{s70}$ : Potencial admissível de passo para 70 kgf [V].

$t_s$ : Tempo de duração do choque [s]

$C_s$ : Função de  $h_s$  e  $k$  (que são parâmetros desenvolvidos através de iteração matemáticas no *software*)

OBS:  $C_s = 1$  para solo sem revestimento (brita)

### **5.1. Potenciais Admissíveis:**

Esta aba é utilizada para definir os parâmetros, como: se terá ou não brita, corrente de falta, tempo de falta e características do operador, que serão utilizados para o cálculo dos potenciais admissíveis.

### **5.2. Parâmetros 3D:**

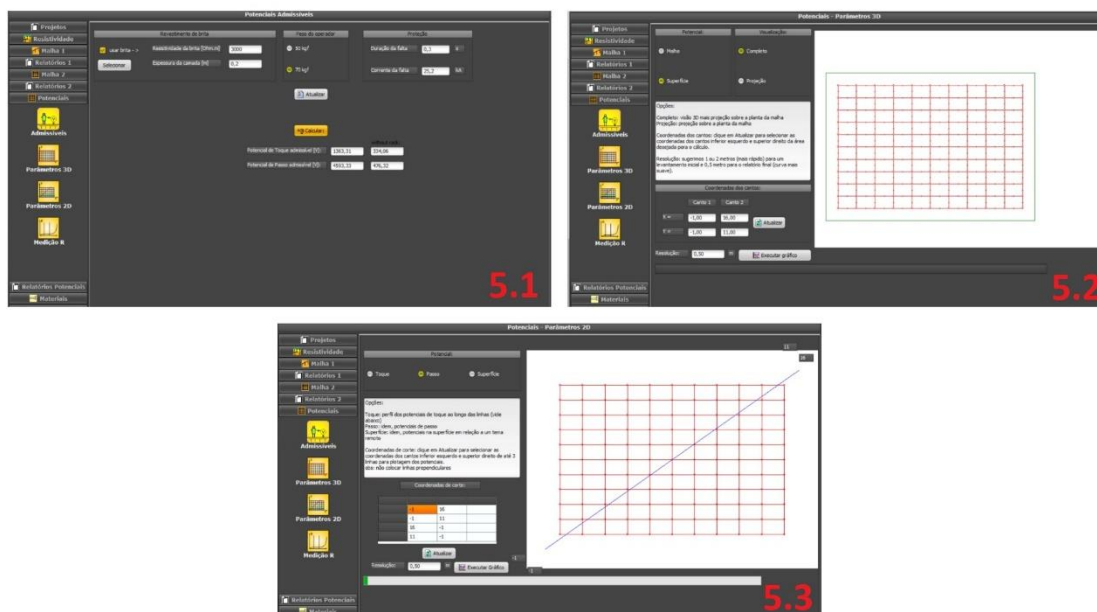
Define os parâmetros para cálculo dos potenciais de malha e superfície, a partir das coordenadas fornecidas pelo projetista. Os resultados são apresentados através de gráficos.

### **5.3. Parâmetros 2D:**

Define os parâmetros para cálculo dos potenciais de toque e passo, a partir das coordenadas fornecidas pelo projetista. Os resultados são apresentados através de gráficos.



**Figura 3. 13** Passo 5 - Potenciais no TecAt Plus 6.3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## **Passo 6. Relatórios Potenciais:**

Seção onde será apresentado os relatórios através de gráfico, dos cálculos resultantes para os potenciais de malha, superfície, toque e passo, conforme.

### **3.7 Metodologia aplicada para dimensionamento da malha no TecAt Plus 6.3**

Conforme os passos apresentados no item anterior e representados no Apêndice G, para o dimensionamento da malha de terra para a subestação proposta, será realizado os seguintes procedimentos no TecAt Plus 6.3 descritos abaixo.

#### **Passo 1. Projeto:**

Foram criados dois programas distintos no TecAt Plus 6.3 para os terrenos analisados, com os dados sugeridos pelo programa: local, data, cliente, projetista ilustrados na Figura 3.14-a e 3.14-b.

Conforme sugere o manual do TecAt Plus 6.3 foram utilizadas todas as configurações em modo original para os passos seguintes, inserindo apenas os dados necessários para a determinação da malha de aterramento.

## Passo 2. Resistividade:

Foi utilizado o método de Wenner a partir da resistência coletada pelo terrômetro digital MTD 20 KWe, a uma profundidade de 30 centímetros e aplicando a fórmula completa, conforme Equação 8.

Para ambos os terrenos, foi realizado a estratificação em 4 camadas, aspirando a menor obtenção de erros, de acordo as resistências levantadas in loco. A Figura 3.14-c apresenta as configurações empregadas no TecAt Plus 6.3.

Durante a inserção dos valores de resistência coletados em campo, foi utilizado a opção “eliminar se  $\geq 50\%$ ”, que descarta valores que ultrapassem a média, propiciando resultados mais precisos.

Até este momento, a estratificação do solo está concluída e o programa fornece os relatórios para cada solo sugerido. Procedeu-se para determinação dos elementos que irão compor a malha de terra e, conseqüentemente determinar a resistência de malha e os potenciais.

**Figura 3. 14** Dados e configurações utilizados no TecAt Plus 6.3.

Dados do Projeto:		Dados do Projeto:	
Projeto:	TCC LUIDI FILIPE - TERRENO 1	Projeto:	TCC LUIDI FILIPE - TERRENO 2
Cliente:	UNICEUB	Cliente:	UNICEUB
Data:	20/09/2017	Data:	29/09/2018
Local:	SENADO FEDERAL	Local:	SAMAMBAIA
<b>a.</b>	<b>b.</b>		
	Configuração:		
	Modelo:	Wenner	
	Fórmula:	Completa	
	Prof. med.:	0,3	
	Exclusão %:	50	
	Esp. mín.:	0,55	
	Aparelho:	Terrômetro digital MTD 20 KWe.	
<b>c.</b>			

Fonte: Elaborado pelo autor.

## Passo 3. Malha 2:

Para o dimensionamento da malha de terra para a subestação comercial sugerida, optou-se pelo uso da ferramenta Wizard dada a sua eficiência, precisão e facilidade operacional.

Foi utilizado a geometria retangular com as dimensões de 15 metros e por 11 metros. Os elementos que compõe a malha, cabo, haste e conexões foram projetados a uma profundidade de 0,5 metros e com todas as configurações padrões do TecAt Plus 6.3.

Visando verificar a interferência de cada solo na determinação da resistência de malha, foram propostas duas alternativas de arranjo para verificar o comportamento da resistência e potenciais em cada uma delas. A Tabela 3.5 detalha cada arranjo sugerido.

#### Passo 4. Relatórios 2:

Os resultados finais decorrentes dos arranjos para os dois terrenos sugeridos foram compilados através de relatórios e gráficos gerados pelo TecAt Plus 6.3 e serão analisados no capítulo 4.

**Tabela 3. 5** Arranjos propostos para dimensionamento da malha de terra.

Arranjo	Detalhamento	
<b>A</b>	<b>Mesh:</b>	10cm X 10cm
	<b>Configuração:</b>	cabos + haste (somente no perímetro)
	<b>Eletrodo:</b>	Ativos
	<b>Distribuição:</b>	Linear
	<b>Haste:</b>	Aço cobreado 3m x 5/8"
	<b>Cabo:</b>	Cabo cobre 50 mm <sup>2</sup>
	<b>Conexão:</b>	Todas em solda
<b>B</b>	<b>Mesh:</b>	10cm X 10cm
	<b>Configuração:</b>	cabos + haste (todos os pontos)
	<b>Eletrodo:</b>	Ativos
	<b>Distribuição:</b>	Linear
	<b>Haste:</b>	Aço cobreado 3m x 3/4"
	<b>Cabo:</b>	Cabo cobre 70 mm <sup>2</sup>
	<b>Conexão:</b>	Todas em solda

Fonte: Elaborado pelo autor.

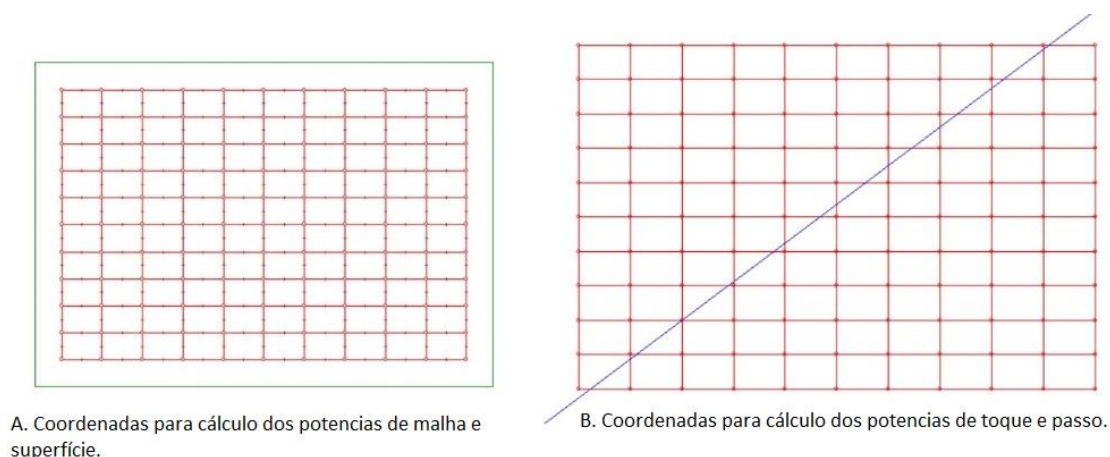
### Passo 5. Potenciais:

No cálculo do potencial admissível para os dois terrenos nos arranjos de malha propostos, foi utilizado brita com uma camada 0,2 metros e resistividade padrão, corrente de falta de 25,20 KA com tempo de duração de 3 segundos, segundo o exemplo extraído do (MAMEDE FILHO, 2017).

Conforme estabelecido na NBR (15751, 2013), foi definido a região que circunda a subestação com uma distância de 1 metro para cálculo dos potenciais de malha e superfície, retratados na Figura 3.15-a.

Optou-se em analisar a partir de uma reta entre a ordenada e abscissa, que corta a área da subestação, os pontos de referência para determinação dos potenciais de toque e passo, conforme a Figura 3.15-b.

**Figura 3. 15** Parâmetros para cálculo de potenciais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### Passo 6. Potenciais:

Semelhante ao Passo 4, os resultados decorrentes dos arranjos para os dois terrenos sugeridos foram compilados através de relatórios e gráficos gerados pelo TecAt Plus 6.3 e serão analisados no capítulo 4.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresentará as simulações e resultados para a malha de aterramento aplicada aos dois terrenos sugeridos, verificando a interferência do solo no dimensionamento do aterramento. Comparados os valores de resistência de malha e potenciais consoante aos esquemas propostos.

Além das análises técnicas, serão estimados os custos para implementação de cada arranjo. Se necessário, os valores adicionais para tratamento do solo na redução da resistência de malha e potenciais, serão adicionados aos custos de implementação.

### 4.1 Resistência apresentada pelos terrenos

O processo para encontrar a resistividade aparente do solo, não ocorre determinando diretamente a grandeza. Através do terrômetro, a informação que será coletada em campo é a resistência do terreno.

Verificou-se uma enorme discrepância entre os valores aferidos nos dois locais, apesar de possuírem o solo caracterizado na mesma classe (latossolos) e utilizarem o mesmo processo e aparelho de medição.

Diante das resistências apresentadas pelos dois terrenos, é possível analisar as possíveis causas da discrepância entre os valores medidos, destacando-se:

1. Teor de umidade no solo provocados pela incidência de chuvas e temperatura durante o período de medição.
2. Utilização do terreno em análise.
3. Características minerais do terreno.

Para a primeira hipótese foi considerado os índices pluviométrico das regiões, nos períodos que antecederam as medições, registrados nas Tabelas 3.1 e 3.3.

Setembro em Brasília é o período final da seca, chegando a condições próxima a de biomas desérticos. Caracterizado pela falta de chuva e elevação de temperatura, que provoca o baixo índice de umidade no solo e no ar. (FALANDO, 2015).

Diante dos dados levantados, verificou-se que durante a medição no Senado Federal, a temperatura esteve mais alta e a umidade mais baixa, comparado com o período de medição no terreno da Samambaia, além de não terem ocorrido chuvas nas localidades analisadas.

Logo, a primeira hipótese para a discrepância das resistências apresentadas é descartada, pois as condições climáticas durante a medição na Samambaia favoreceriam a redução das resistências aferidas, o que não ocorreu empiricamente.

A segunda hipótese a ser considerada é relacionada com a utilização dos solos, enquanto a área no Senado Federal destina-se a um jardim, o terreno na Samambaia atualmente é uma área ociosa da cidade, sem qualquer destinação.

No primeiro caso que apresentou menor resistividade (Senado Federal), frequentemente o solo está sendo tratado através da aplicação de produtos orgânicos e químicos, com o objetivo de propiciar um solo mais fértil.

Ao realizar o processo de fertilização do solo para jardinagem, indiretamente a resistividade do solo está sendo reduzida, pois o latossolo que apresenta uma estrutura mais resistiva devido as características minerais, passará a ter maior concentração de elementos condutivos.

Na Samambaia, diferentemente do que ocorre no Senado Federal, o solo não recebe tratamento algum. A destinação do terreno tem impacto direto na sua resistividade, devido a necessidade de tratamento do solo para o fim desejado, o que remete para a terceira hipótese sugerida.

Apesar das diferenças na utilização dos terrenos e parâmetros climáticos, a diferença verificada no levantamento das resistências pode ser explicada a partir da composição mineral do solo, que passa a ser a hipótese mais plausível para os valores encontrados.

As características minerais particulares dos terrenos propiciam a diferença resistiva, que será fundamental para o projeto de aterramento da subestação, já que uma análise aprofundada do solo foge do objetivo deste trabalho.

## 4.2 Determinação da resistividade

A seguir serão apresentados os resultados da estratificação para os terrenos do Senado Federal e Samambaia, de acordo com os procedimentos descritos no passo 2 do item 3.7.

### 4.2.1 Estratificação do terreno 1: Senado Federal

De acordo com os dados fornecidos pela IPT ENGENHARIA compilados na Tabela 3.2, o terreno no Senado Federal não apresentou nenhum valor aferido que ultrapassou o limite de 50% acima da média, apresentado na Figura 4.1.

**Figura 4. 1** Medidas referentes ao terreno do Senado Federal no TecAT Plus 6.3.

Fórmula:

completa

☒ eliminar se >

50

% fora da média

Modelo:

Wenner

Profundidade (h)

0,3

m

Dados em:

Resistência

a	A	B	C	D	E	F	G	H	média	
	[m]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	rm
1	15	14,66	18,32	14,49						111,6889
2	8,66	11,36	8,38	7,79						118,0186
4	4,83	7,29	4,22	4,74						133,7419
8	2,85	4,18	2,43	2,55						151,2927
▶ 16	1,92	2,3	1,35	1,09						167,4869

Fonte: Elaborado pelo autor

Em cada ponto nos eixos analisados, o maior desvio foi de 0,22%. Enquanto no desvio RMS teve erro de 0%. Ambos os desvio estão abaixo dos recomendados pelas Equações 43 e 44. Os resultados são exibidos na Figura 4.2.

A estratificação no Senado Federal foi aprovada, resultando em uma resistividade na última camada de 223,07 [ $\Omega$ .m], apresentado na Figura 4.3 diagramas do terreno e gráfico da resistividade na Figura 4.4.

**Figura 4. 2** Relatório de estratificação no terreno do Senado Federal.

Dados do Projeto:  
 Projeto: TCC LUIDI FILIPE - TERRENO 1  
 Cliente: UNICEUB  
 Data: 20/09/2017  
 Local: SENADO FEDERAL

Configuração:  
 Modelo: Wenner  
 Fórmula: Completa  
 Prof. med.: 0,3  
 Exclusão %:50  
 Esp. mín.: 0,55  
 Aparelho: Terrômetro digital MTD 20 KWe.

Medições:

espaçamento [m]	linhas de medição: [Ohm]							
a	A	B	C	D	E	F	G	H
1,00	15,00	14,66	18,32	14,49	0,00	0,00	0,00	0,00
2,00	8,66	11,36	8,38	7,79	0,00	0,00	0,00	0,00
4,00	4,83	7,29	4,22	4,74	0,00	0,00	0,00	0,00
8,00	2,85	4,18	2,43	2,55	0,00	0,00	0,00	0,00
16,00	1,92	2,30	1,35	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

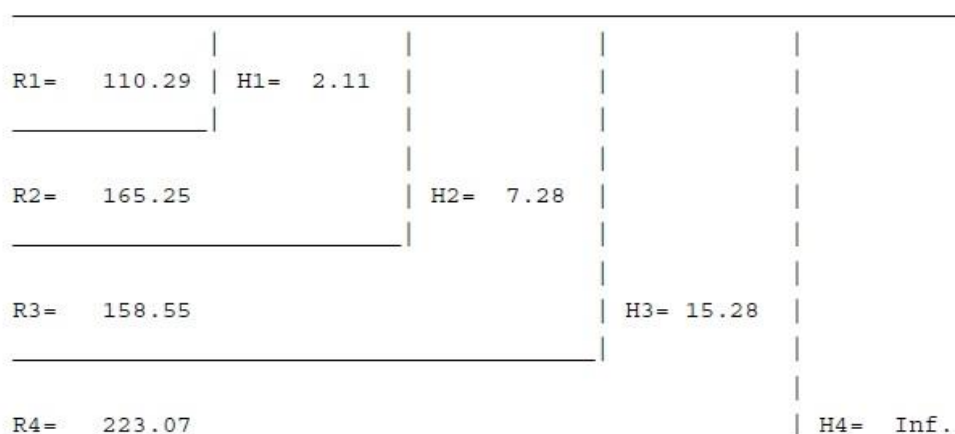
espaçamento [m]	medida [Ohm.m]	calculada [Ohm.m]	desvio %
1,00	111,69	111,78	-0,08
2,00	118,02	118,00	0,02
4,00	133,74	133,53	0,16
8,00	151,29	151,27	0,02
16,00	167,49	167,12	0,22

erro RMS = 0 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 3** Diagrama do terreno para estratificação no Senado Federal.

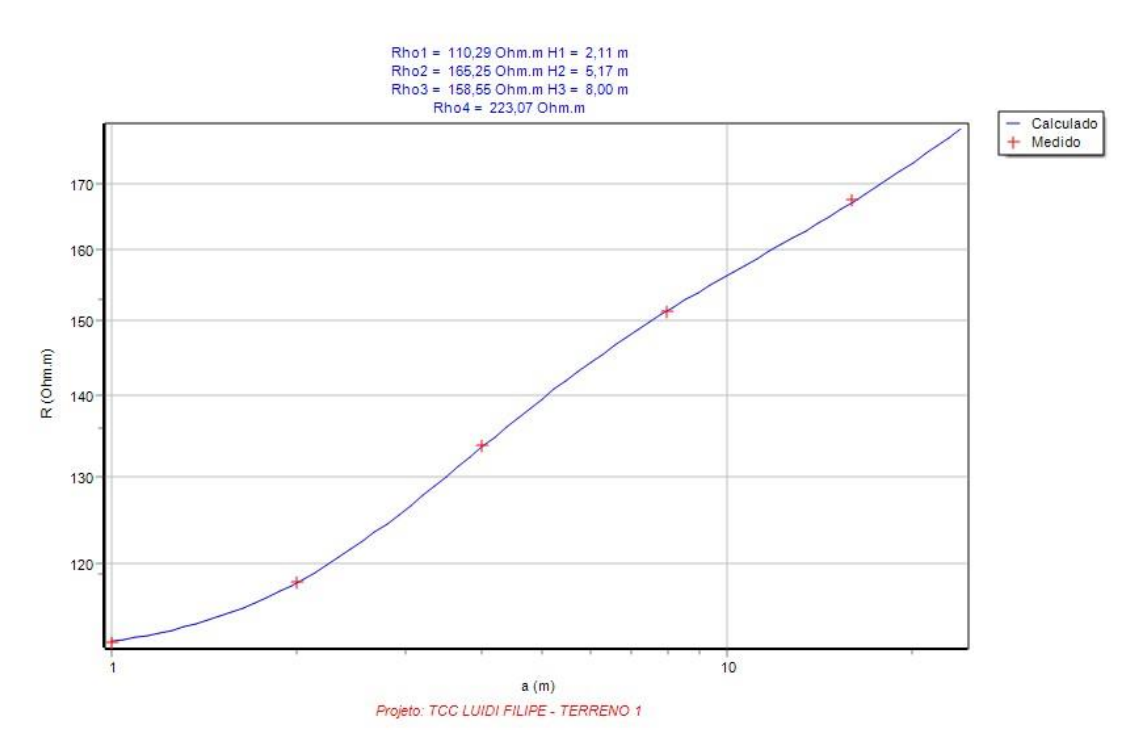
Diagrama:



Fonte: Elaborado pelo autor.



**Figura 4. 4** Gráfico da resistividade para o terreno no Senado Federal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.2 Estratificação do terreno 2: Samambaia

Das 30 medições aferidas para o terreno na Samambaia, detalhadas na Tabela 3.2, apenas 5 foram descartadas, representando 16,66% do valor total. A Figura 4.5 apresenta os valores de resistências do solo na Samambaia, lançados no software.

**Figura 4. 5** Medidas referentes ao terreno da Samambaia no TecAt Plus 6.3.

Fórmula:

completa

☒ eliminar se >

50

% fora da média

Modelo:

Wenner

Profundidade (h)

0,3

m

Dados em:

Resistência

a

A

B

C

D

E

F

G

H

média

	[m]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	rm
1		680	1037	1022	1126	908	905			6538,680
2		762	803	876	816	716	720			10091,33
4		348	481	435	484	363	358			10412,39
8		45,9	341	129,6	123,5	70,5	86,9			5167,297
▶ 16		24,7	19,23	25	20,9	89,4	63			2366,839

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o terreno foi estratificado em mais eixos, as amostras eliminadas correspondem a um eixo, sendo irrisórias para a determinação da resistividade, comprovada através dos parâmetros de desvio resultantes.

Para o desvio no ponto o erro variou entre -1,74% a 2.39%, valores que ficam aquém da faixa dos 30%. O desvio RMS foi de 1%. Ambos os desvios foram atendidos, logo, estratificação aprovada consoante a Figura 4.6.

O terreno na Samambaia apresentou uma resistividade de 24.687,39 [ $\Omega$ .m] detalhada nas Figuras 4.7 e 4.8 que trazem o diagrama do solo estratificado e o gráfico da resistividade.

**Figura 4. 6** Relatório de estratificação no terreno da Samambaia.

Dados do Projeto:

Projeto: TCC LUIDI FILIPE - TERRENO 2

Cliente: UNICEUB

Data: 29/09/2018

Local: SAMAMBAIA

Configuração:

Modelo: Wenner

Fórmula: Completa

Prof. med.: 0,3

Exclusão %:50

Esp. mín.: 0,55

Aparelho: Terrômetro Digital MTD 20 KWe

Medições:

espaçamento

linhas de medição:

[m]

[Ohm]

a

A

B

C

D

E

F

G

H

1,00

680,00

1037,00

1022,00

1126,00

908,00

905,00

0,00

0,00

2,00

762,00

803,00

876,00

816,00

716,00

720,00

0,00

0,00

4,00

348,00

481,00

435,00

484,00

363,00

358,00

0,00

0,00

8,00

45,90

341,00

129,60

123,50

70,50

86,90

0,00

0,00

16,00

24,70

19,23

25,00

20,90

89,40

63,00

0,00

0,00

Ajuste da Estratificação da Resistividade do Solo:

espaçamento

medida

calculada

desvio

[m]

[Ohm.m]

[Ohm.m]

%

1,00

6767,73

6885,75

-1,74

2,00

10202,85

10136,73

0,65

4,00

10443,04

10193,79

2,39

8,00

5171,16

5242,51

-1,38

16,00

2367,28

2362,26

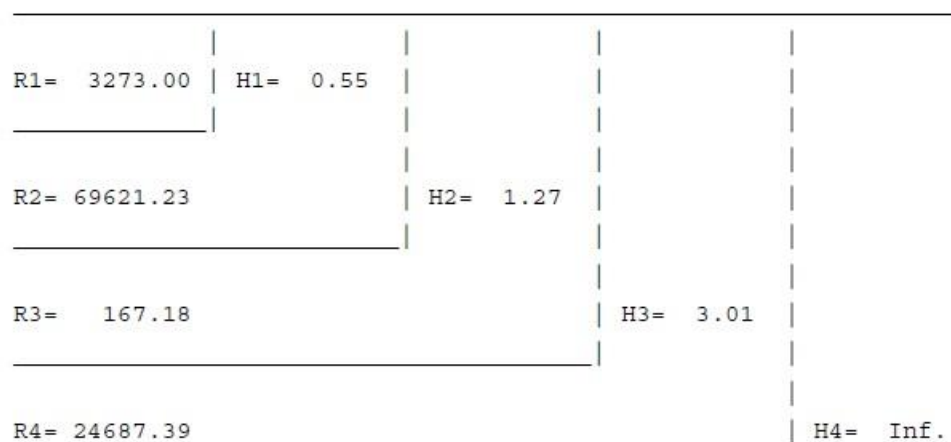
0,21

erro RMS = 1 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

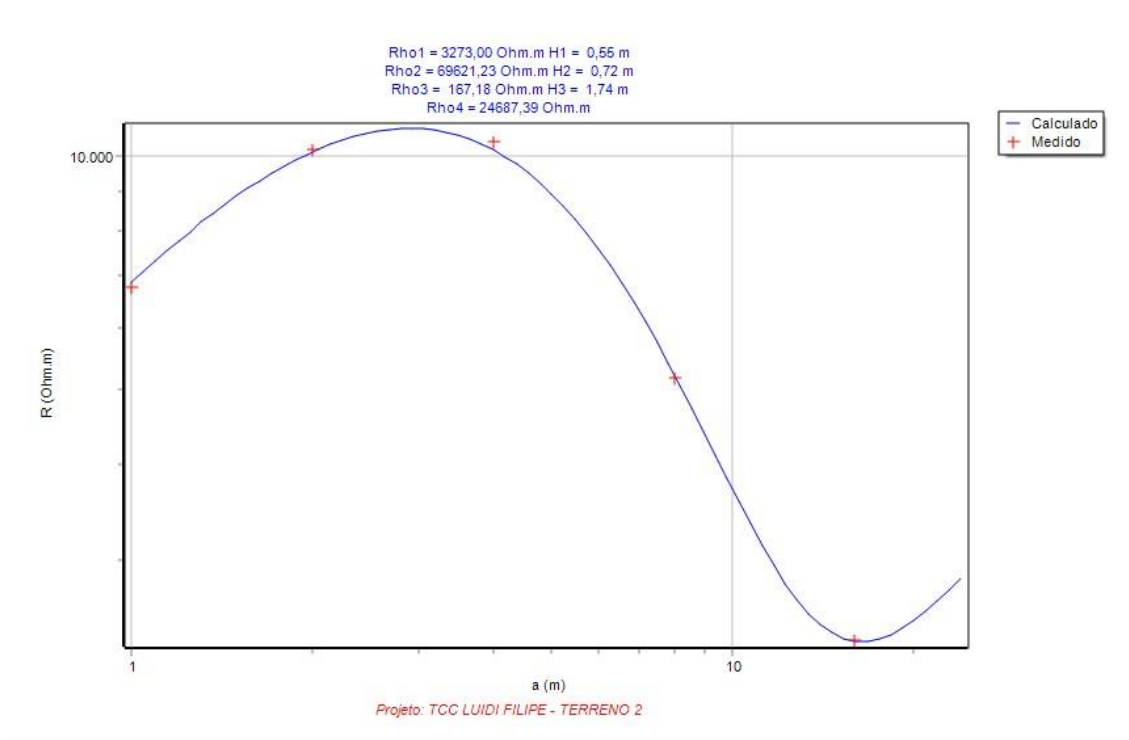
**Figura 4. 7** Diagrama do terreno para estratificação na Samambaia.

Diagrama:



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 8** Gráfico da resistividade para o terreno na Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.3 Avaliação das resistividades determinadas

Conforme as resistências coletadas no terreno do Senado Federal e Samambaia, eram esperadas que após a estratificação, as resistividades também apresentassem discrepâncias.

Foram compiladas na Tabela 4.1 as diferenças entre as resistividades indicadas em cada uma das quatro camadas estratificadas, para os terrenos em análise.

**Tabela 4. 1** Discrepância apresentada entre as camadas dos terrenos analisados.

Terreno	Camadas [ $\Omega.m$ ]			
	1	2	3	4
Senado Federal	110,29	165,25	158,55	223,07
Samambaia	3.273,00	69.621,23	167,18	24.687,39
Discrepância	3.261,71	69.455,98	8,63	24.464,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando os dois terrenos estratificados em quatro camadas, três delas tiveram diferenças exorbitantes. A menor delas na primeira camada, o terreno da Samambaia apresentou uma resistividade 30 vezes maior que no terreno do Senado, chegando a quase 422 vezes na quarta camada.

## 4.3 Dimensionamento da malha de terra

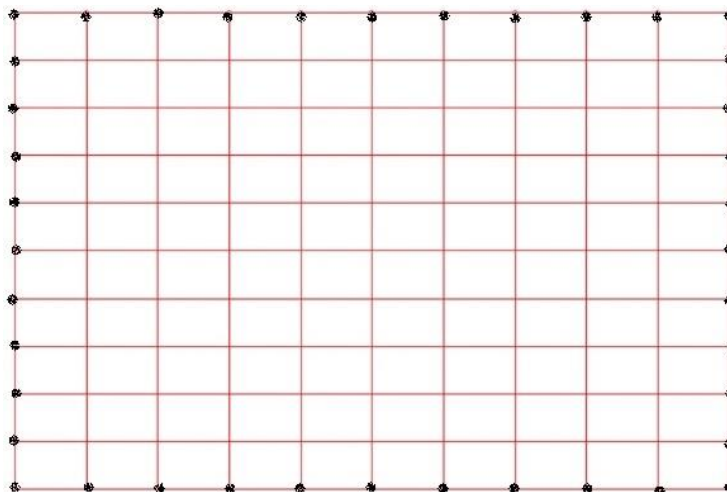
Consoante ao objetivo do trabalho em verificar o comportamento da resistência de aterramento, para a mesma malha aplicada a dois terrenos com características distintas. Foram propostos os arranjos A e B, detalhados na Tabela 3.5.

### 4.3.1 Arranjo de malha A

O primeiro arranjo foi denominado de A e consiste numa malha de 15 m por 10 m, *mesh* de 10 cm x 10 cm, composta por cabos e hastes fincados apenas no perímetro da malha, representada na Figura 4.9.

O arranjo A possui distribuição linear com eletrodos ativos, cabos em cobre de 50 mm<sup>2</sup>, hastes em aço cobreado de 3m x 5/8" e conexões em solda. Através da ferramenta *Wizard*, o TecAt Plus 6.3 estima a quantidade de materiais necessários para execução do projeto, consoante a Figura 4.10.

**Figura 4. 9** Arranjo da malha A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 10** Materiais referentes ao arranjo A.

TCC LUIDI FILIPE - ARRANJO A		
Materiais		
quantidade	unidade	descrição
40 hastes	un	aço cobreado 3 m x 5/8
275 cabo	m	cabo cobre 50 mm <sup>2</sup>
27 conexão	un	molde solda CH 50 mm <sup>2</sup> x 5/8
55 conexão	un	molde solda X 50x50 mm <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a relação de materiais fornecida pelo TecAt Plus 6.3, foram orçados no mercado os valores para os itens que compõe o arranjo. Os materiais referentes à malha A foram orçados em R\$ 18.492,15 sendo fornecidos pela MONTAL INSTALAÇÕES E COMÉRCIO LTDA e registrado no Anexo H.

Para levantamento do preço da mão de obra foi acionada a IPT ENGENHARIA, empresa especializada em sistemas de aterramento. Para execução do serviço, a empresa propôs uma equipe composta de 2 ajudantes, 1 eletricista, 1 engenheiro e 1 projetista. O serviço ficou orçado em R\$ 14.937,00.

Além do custo de material e mão de obra, será necessário a alocação de maquinário para realizar a abertura do terreno para instalação da malha. Foi orçado com a FC LOCAÇÕES uma máquina perfuratriz pelo período de 2 dias, de acordo com o orçamento no Anexo I.

Os custos previstos para execução do arranjo A estão detalhados na Tabela 4.2.

**Tabela 4. 2** Previsão de custos para instalação da malha de terra no arranjo A.

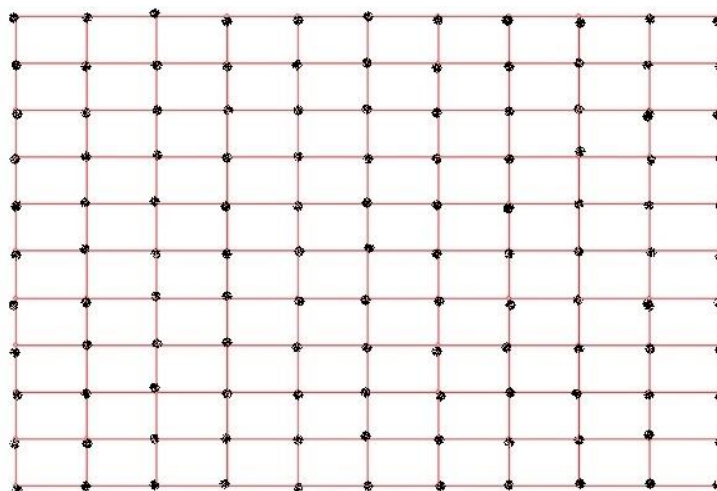
<b>Arranjo A</b>	<b>Valor [R\$]</b>
Material	18.492, 15
Mão de Obra	14.937,00
Maquinário	1.450,00
<b>TOTAL</b>	<b>34.879,15</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **4.3.2 Arranjo de malha B**

O segundo arranjo denominado de B possui as mesmas dimensões físicas que o arranjo A, porém, as hastes são dispostas em todos os pontos de intersecção mais os pontos perimetrais, conforme Figura 4.11.

Este arranjo é mais robusto, sendo composto de cabos em cobre de 70 mm<sup>2</sup>, hastes em aço cobreado de 3m x 3/4" e conexões em solda. A Figura 4.12 apresenta os materiais necessários para construção do arranjo.

**Figura 4. 11** Arranjo da malha B.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 12** Materiais referentes ao arranjo B.

<b>TCC LUIDI FILIPE - ARRANJO B</b>		
<b>Materiais</b>		
quantidade	unidade	descrição
121 hastes	un	aço cobreado 3 m x 3/4
275 cabo	m	cabo cobre 70 mm <sup>2</sup>
21 conexão	un	molde solda CH 70 mm <sup>2</sup> x 3/4
55 conexão	un	molde solda X 70x70 mm <sup>2</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido a ter materiais com maiores dimensões, consequentemente será mais caro. Os materiais detalhados na Figura 4.13, foram orçados na MONTAL INSTALAÇÕES E COMÉRCIO LTDA, no valor de R\$ 33.515,82 e está registrado no Anexo J.

Para mão de obra o serviço foi orçado com a IPT ENGENHARIA no valor de R\$ 20.905,00. O aluguel de maquinário para 5 dias com a FC LOCAÇÕES ficou em R\$ 1.500,00 . A Tabela 4.3 traz a previsão de custos para execução do arranjo B.

**Tabela 4. 3** Previsão de custos para instalação da malha de terra no arranjo B.

<b>Arranjo B</b>	<b>Valor [R\$]</b>
Material	33.515,82
Mão de Obra	20.905,00
Maquinário	1.550,00
<b>TOTAL</b>	<b>55.970,82</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **4.4 Aplicação dos arranjos propostos**

A seguir serão aplicados os arranjos sugeridos A e B para os terrenos no Senado Federal e Samambaia, analisados os valores de resistência de malha, potenciais e custo.

##### **4.4.1 Arranjo A para terreno no Senado Federal**

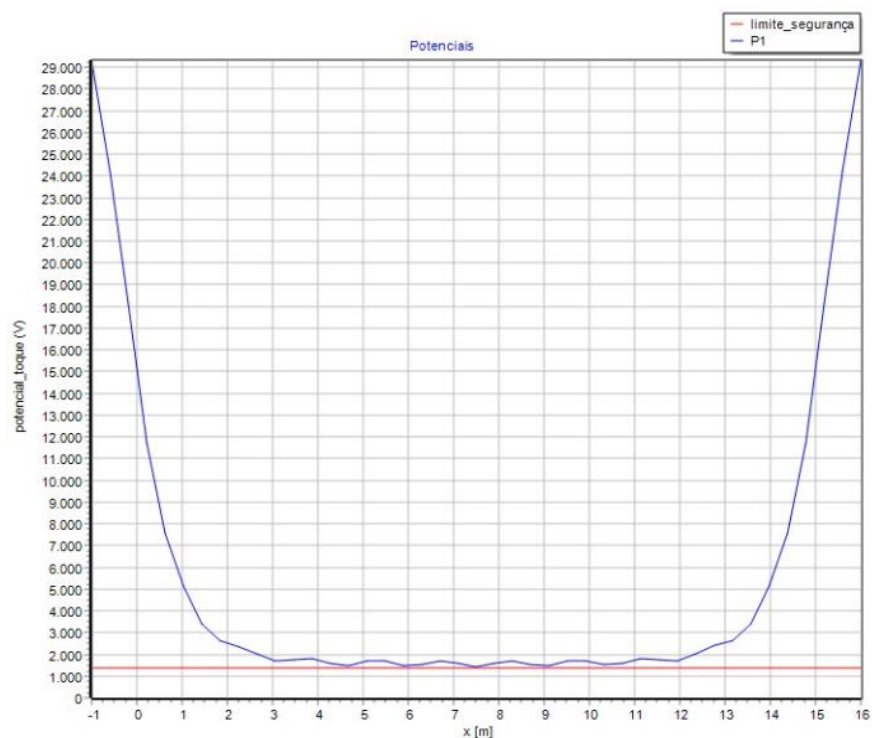
Simulado o primeiro arranjo no Senado Federal, foi encontrado uma resistência de 4,36 [ $\Omega$ ] retratada no Apêndice H, que atende o valor mínimo de 10 [ $\Omega$ ] recomendado na (ABNT, 2015) e adotada em projetos de aterramento.

Os potenciais admissíveis no TecAt Plus 6.3 são fixos, independente dos arranjos de malha conforme Equações 45 e 46. Assim o que irá sofrer variação, serão os potenciais dentro de um limite pré-calculado.

Verificou-se que os potenciais admissíveis máximos para toque e passo são 1.363,31 [V] e 4.593,33 [V], representado no Apêndice I. O potencial de passo ficou dentro do limite, enquanto o potencial de toque ultrapassou o limite calculado, mas com uma pequena variação. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os potenciais determinados.

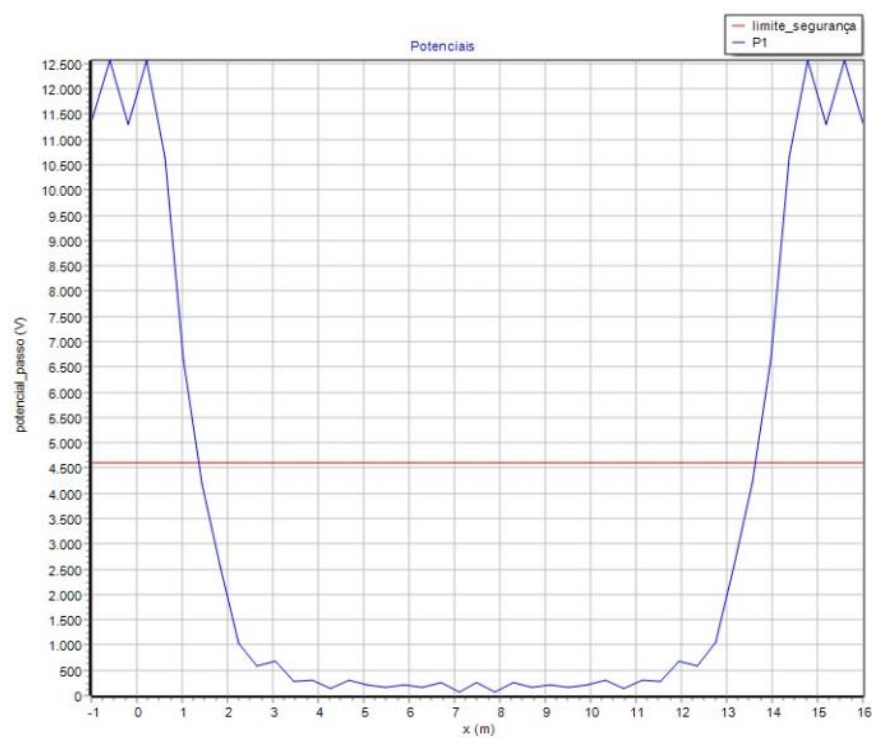


**Figura 4. 13** Potencial de toque para arranjo A aplicado ao terreno do Senado Federal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 14** Potencial de passo para arranjo A aplicado ao terreno do Senado Federal.



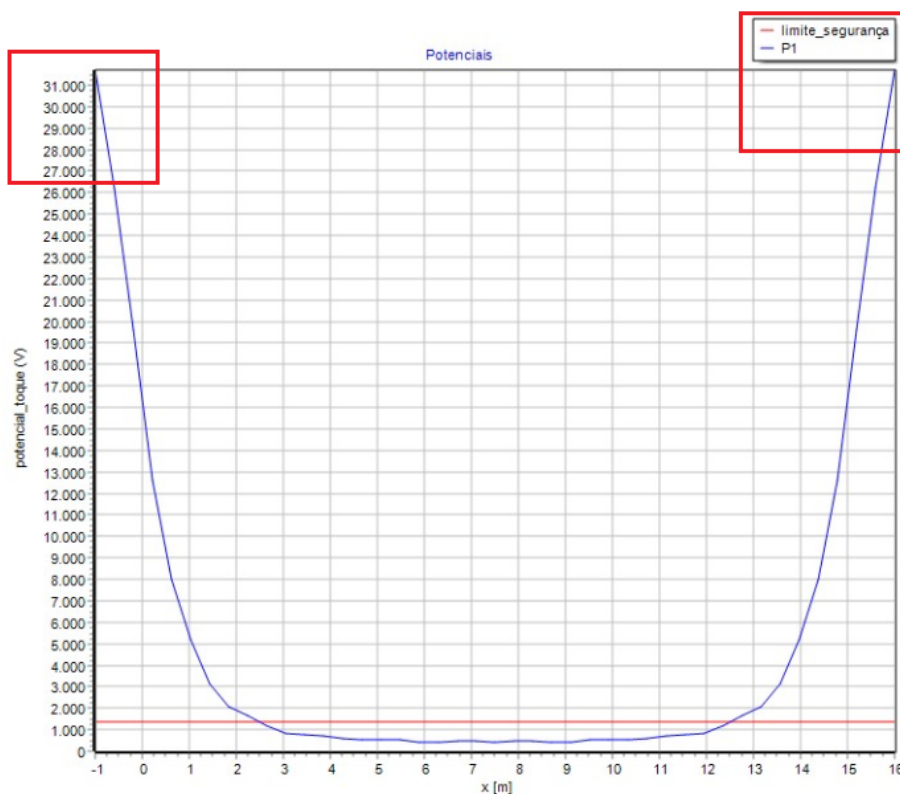
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.2 Arranjo B para terreno no Senado Federal

Apresentou uma resistência de malha de 4,25 [ $\Omega$ ], que atende o valor usualmente utilizado na área e estabelecido em norma. O Apêndice H apresenta o resultado.

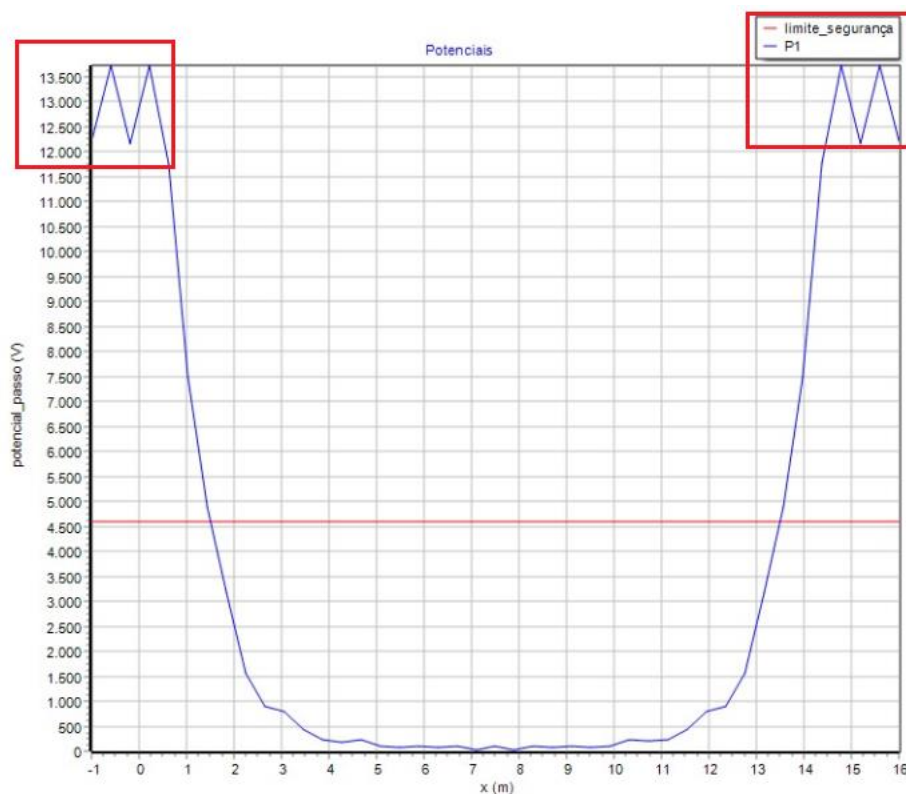
Conforme mencionado anteriormente, os potenciais admissíveis permanecem os mesmos para ambos os arranjos. Potencial de toque ficou acima do limite admissível, com níveis de tensão superiores nas bordas da subestação. Já o potencial de passo apresentou maiores picos nas bordas, ilustrados nas Figuras 4.15 e 4.16.

**Figura 4. 15** Potencial de toque para arranjo B aplicado ao terreno do Senado Federal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 16** Potencial de passo para arranjo B aplicado ao terreno do Senado Federal.



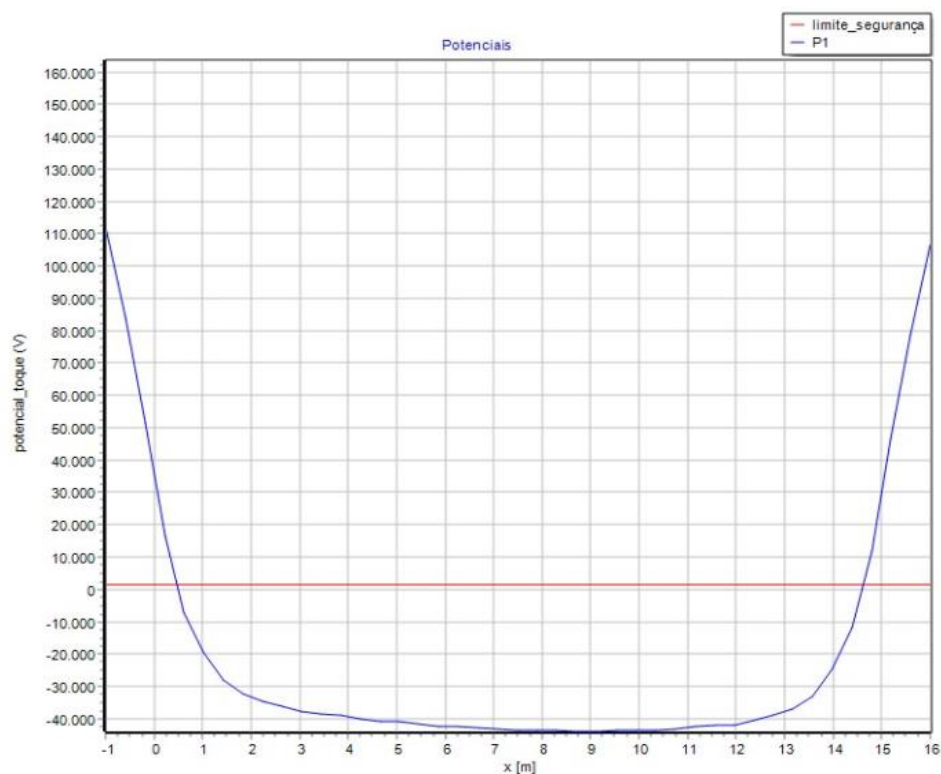
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.3 Arranjo A para terreno na Samambaia

O arranjo A aplicado na Samambaia retratado no Apêndice J, apresentou uma resistência de 61,11  $[\Omega]$ , valor superior ao estabelecido em norma. Resultado esperado devido à alta resistividade calculada.

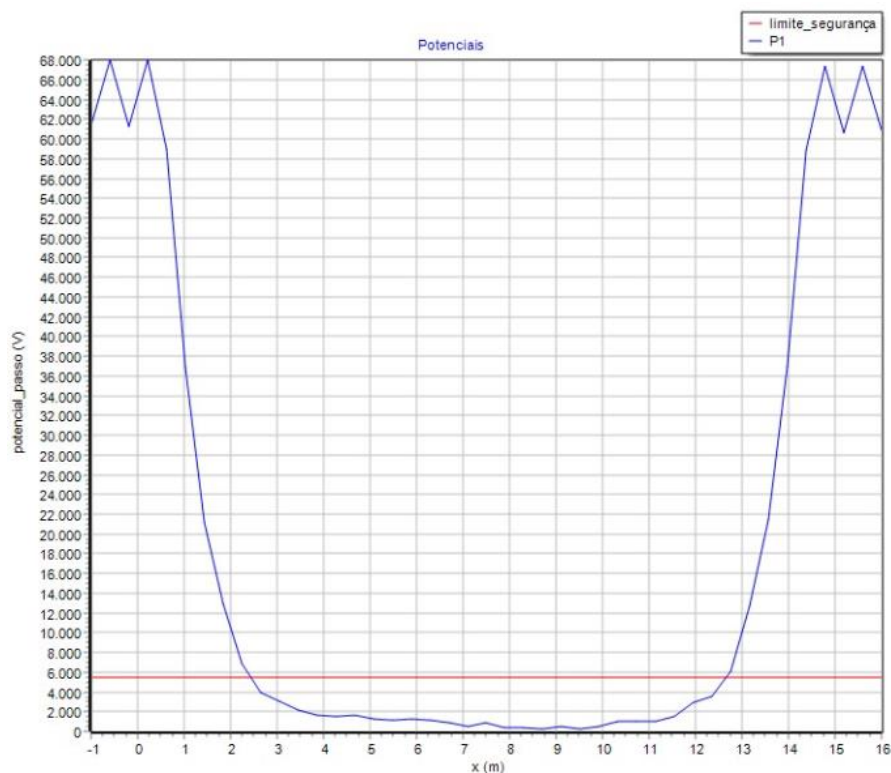
Os potenciais admissíveis de toque 1.576,53 [V] e passo 5.446,19[V] são ilustrados no Apêndice K. Para este arranjo os potenciais ficaram nas faixas admissíveis, apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18.

**Figura 4. 17** Potencial de toque para arranjo A aplicado ao terreno da Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 18** Potencial de passo para arranjo A aplicado ao terreno da Samambaia.



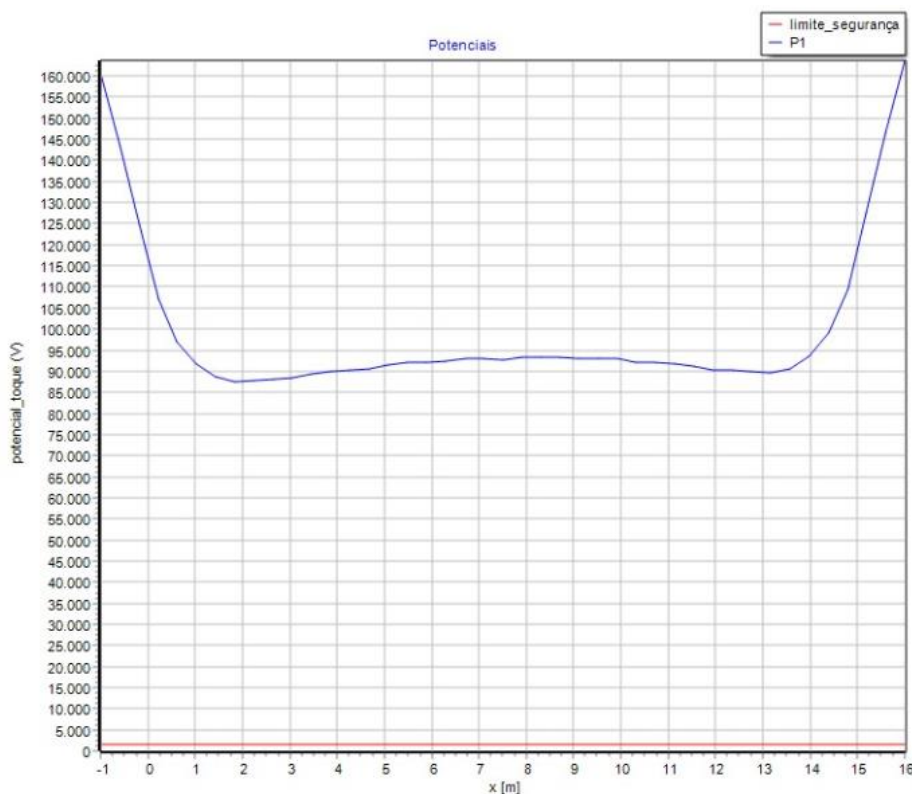
Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.4 Arranjo B para terreno na Samambaia

Neste arranjo o terreno apresentou uma resistência de 60,87 [ $\Omega$ ], que reflete uma redução irrisória da resistência comparada ao arranjo anterior. O Apêndice J apresenta o relatório do arranjo B para Samambaia.

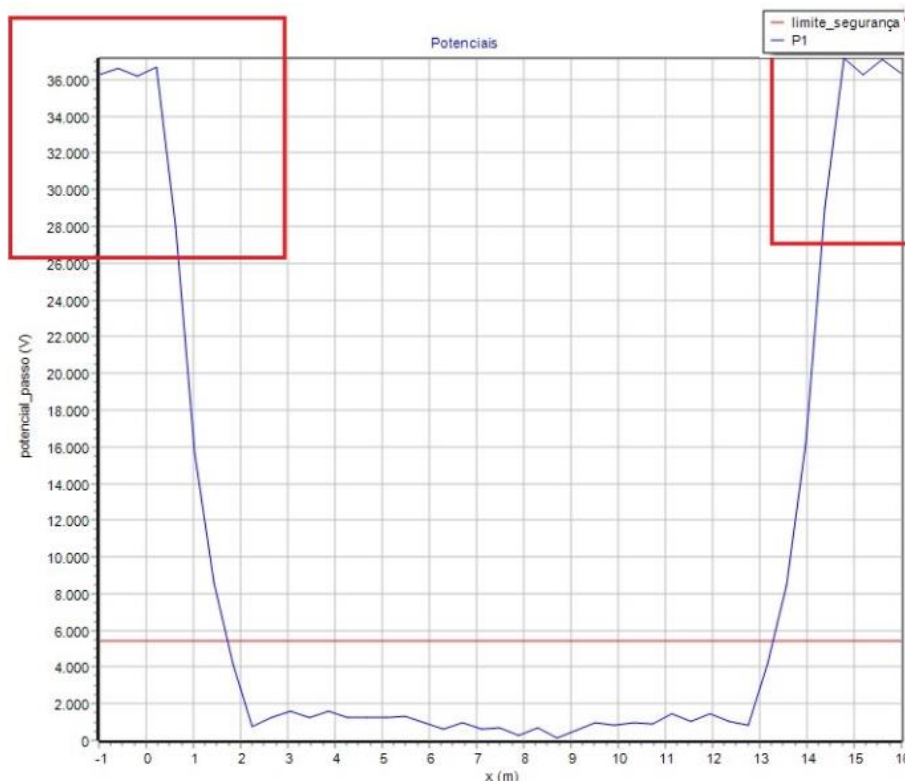
Os potenciais admissíveis permanecem os mesmos descritos no Apêndice K. O potencial de toque teve uma elevação significativa, ultrapassando o limite de segurança representado na Figura 4.19. Enquanto o potencial de passo permaneceu no limite recomendado e teve seu pico de tensão nas bordas da subestação reduzido, de acordo com a Figura 4.20.

**Figura 4. 19** Potencial de toque para arranjo B aplicado ao terreno da Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 20** Potencial de passo para arranjo B aplicado ao terreno da Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### **4.4.5 Avaliação dos arranjos aplicados**

Baseado nas resistividades dos terrenos, a previsão sobre a discrepância entre as resistências de malha foi confirmada na qual, a resistência final do Senado Federal foi menor que na Samambaia.

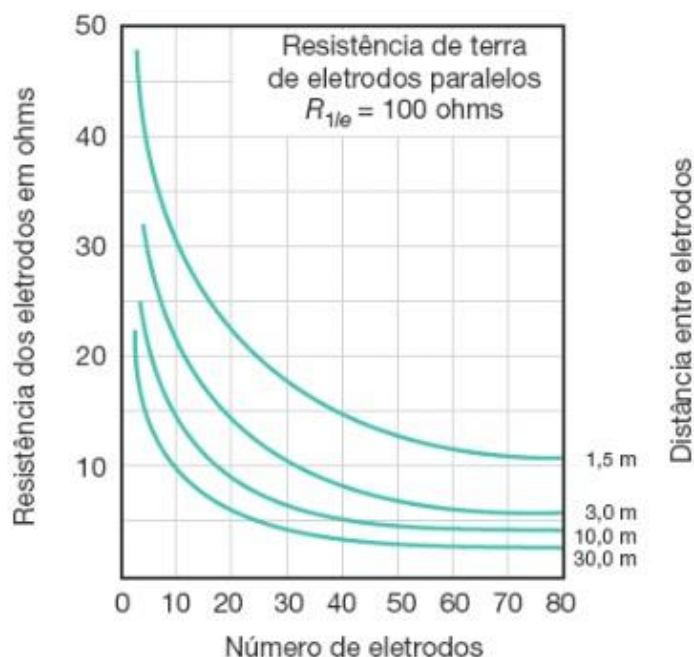
Durante o dimensionamento das malhas para cada terreno, foi evidenciado que o arranjo A apresentou melhor rendimento técnico e econômico que o arranjo B.

No aspecto técnico, com o arranjo B esperava-se obter uma redução expressiva na resistência de malha comparado com o arranjo A, porém, o arranjo B possui muitas hastes com baixo espaçamento entre elas, fator que favorece o aumento da resistência mútua.

Quando dois eletrodos em paralelo são transpassados de corrente, será gerada uma diferença de potencial que provocará uma resistência mútua entre ambos, somada a resistência própria de cada um. (VISACRO FILHO, 2002)

Em um sistema de aterramento, quanto mais hastes próximas, maior será a resistência, conforme a Figura 4.21. Recomenda-se que a distância mínima entre os eletrodos corresponda ao comprimento de uma das hastes. (MAMEDE FILHO, 2017)

**Figura 4. 21** Resistencia de terra dos eletrodos.



Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.

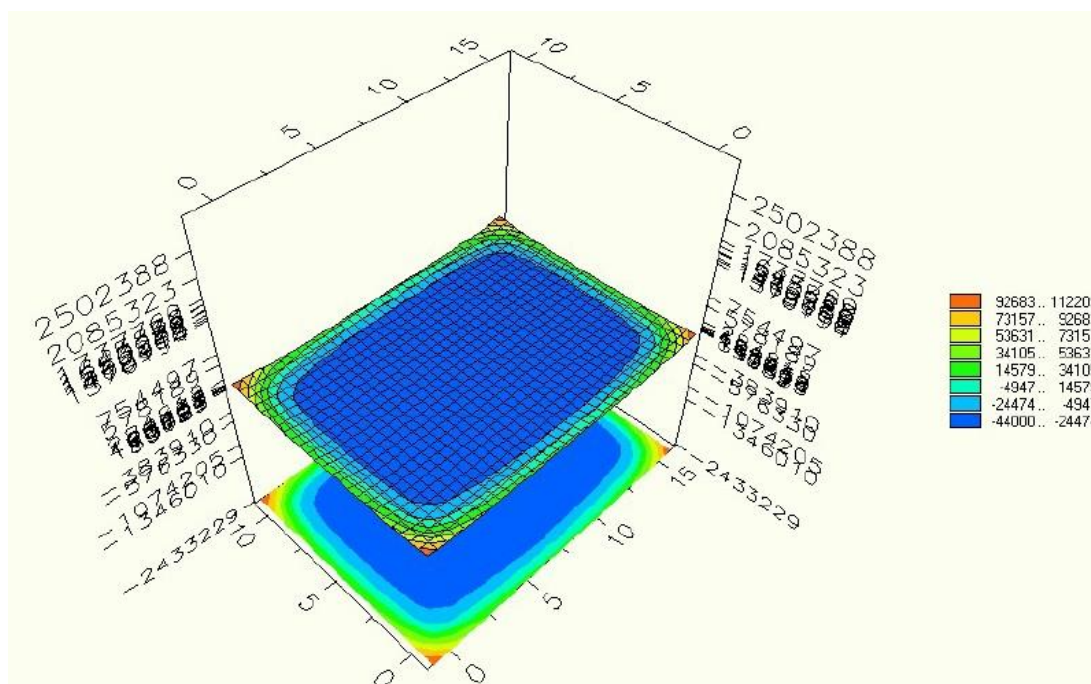
Observou-se também que o arranjo A apresentou níveis estáveis de tensão em ambos os terrenos, onde os gradientes ficavam mais uniformes na área da malha, retratado nas Figuras 4.22 e 4.23 através das áreas em cores frias.

É possível observar que nos cantos da malha há uma elevação dos gradientes de tensão, representados em tonalidades quentes, proveniente da dissipação da corrente de falta no sistema, que tende a fluir para as periferias da malha. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995)

As elevações no potencial de malha no arranjo B refletiram consideravelmente no terreno da Samambaia, onde o potencial de toque ficou muito acima do limite admissível.

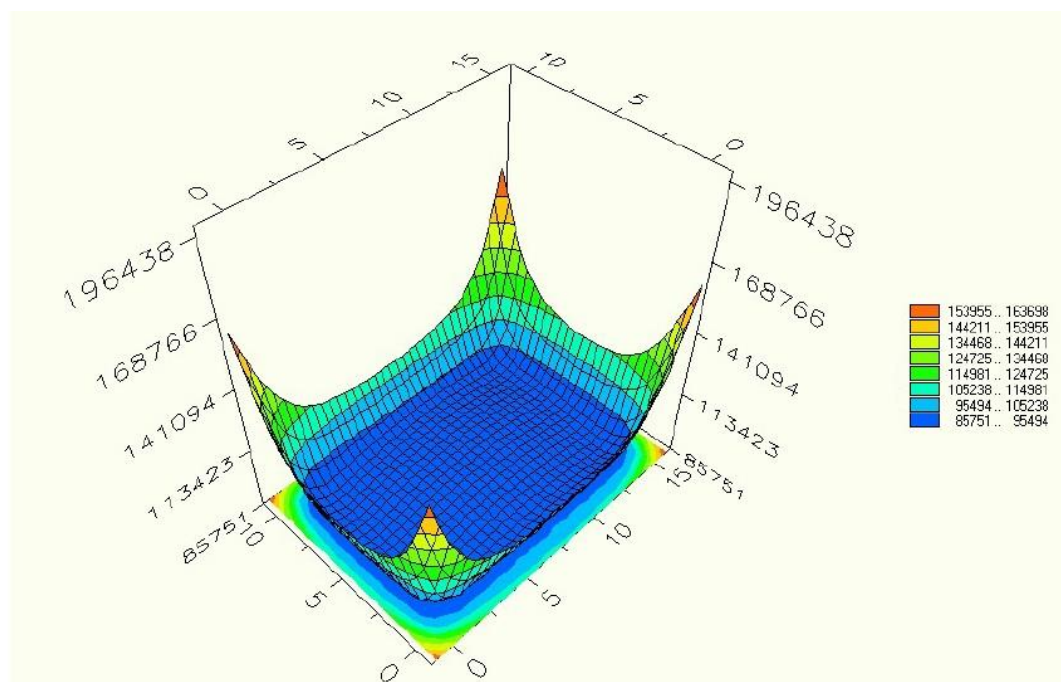


**Figura 4. 22** Potencial de malha para arranjo A aplicado ao terreno da Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 23** Potencial de malha para arranjo B aplicado ao terreno da Samambaia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No aspecto econômico, a malha B teve um custo de 62,32% superior à malha A. Para ambos os terrenos a implantação do arranjo B pode ser descartada, decorrente aos baixos índices de redução nos parâmetros analisados.



Para otimização técnica e econômica do projeto, é possível realizar teste com a redução dos *meshs* além de retirar hastes da periferia da malha. Tal ação irá reduzir custos e o acoplamento mútuo causado pela aproximação dos elementos dissipadores de corrente.

Quanto ao terreno da Samambaia, que teve os valores de resistência e potenciais fora dos limites de norma, é necessário o tratamento do solo, portanto nos próximos itens serão apresentados os respectivos métodos para redução dos parâmetros de projeto.

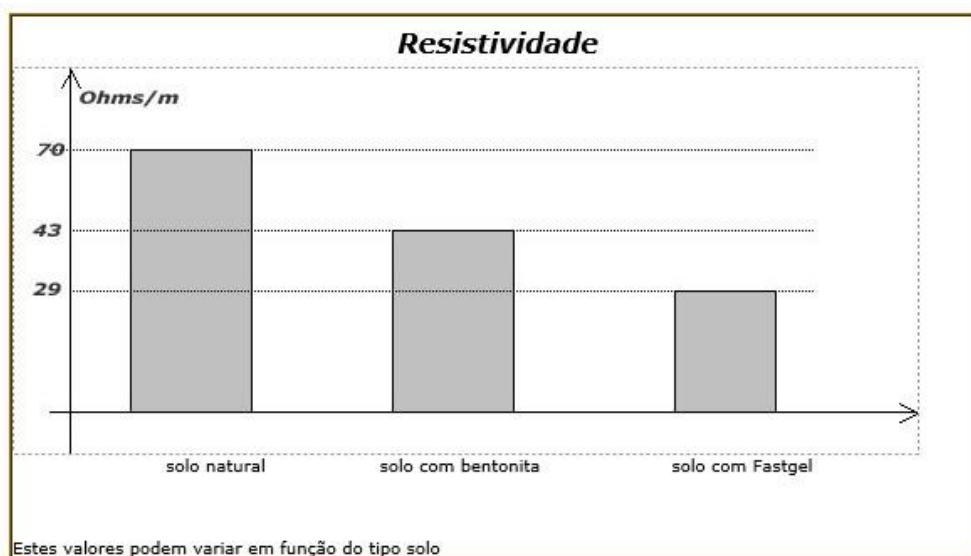
#### 4.5 Tratamento químico do solo no terreno da Samambaia

O tratamento químico do solo foi simulado com a utilização do gel, devido a sua eficiência se comparado a bentonita e outros recursos químicos, demonstrado na Figura 4.24.

Segundo a (MONTAL, 2018) a utilização do gel para aterramento garante uma redução de até 75% da resistividade apresentada pelo terreno.

Baseado na faixa de redução fornecida pelo fabricante, foram aplicadas reduções de 25%, 50% e 75% nos valores de resistência encontrados para o terreno na Samambaia.

**Figura 4. 24** Comparação entre a aplicação do gel x bentonita.



Fonte: FASTWELD, 2018

Foi utilizado a Equação 47 que determina a quantidade de gel a ser utilizado no tratamento de hastes verticais, baseado nas dimensões do elemento. (FASTWELD, 2018)

$$Q_f = SF \rightarrow Q_f = \pi r^2 h F \quad (47)$$

Sendo:

$Q_f$ : Quantidade de gel a ser aplicado por haste [g]

$\pi$ : Raio circunvizinho ao cravamento da haste [mm]

$h$ : Altura da haste [mm]

$F$ : Densidade referente ao gel de aterramento de 0,000925 [g/mm<sup>3</sup>]

O procedimento para aplicação do gel adotado, consiste na abertura de um buraco de 800 [mm] próximo a haste. Devido à proximidade entre as hastes e as dimensões da subestação, será utilizado um diâmetro de 100 [mm] com uma haste de comprimento de 3.000 [mm].

$$Q_f = \pi r^2 h F \rightarrow Q_f = \pi \times \left(\frac{100}{2}\right)^2 \times 3000 \times 0,000925 \rightarrow$$

$$Q_f = 10.897,40 \text{ [g]} \rightarrow Q_f = \frac{10.897,40}{1.000} \rightarrow Q_f = 10,89 \text{ [kg]}$$

Comercialmente o gel de aterramento é vendido em pacotes de 12 kg, para simplificação, cada haste receberá aplicação de 10,89 kg para 12 kg. O gel foi orçado na MONTAL INSTALAÇÕES E COMÉRCIO LTDA e está registrado nos Anexos E e H.

Para o arranjo A composto de 40 hastes, o valor do gel químico foi orçado em R\$ 888,80. O arranjo B de 121 hastes, o tratamento ficou em R\$ 2.688,62.

A mão de obra irá despender um valor maior, além do aumento no número de diárias da máquina perfuratriz, que passará para 5 dias no Arranjo A e 15 dias no arranjo B, conforme preços orçados com A FC LOCAÇÕES e registrado no Anexo I.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam os custos levantados e os orçamentos referentes estão nos Anexos H e J.

**Tabela 4. 4** Previsão de custos para instalação da malha de terra com tratamento do solo no arranjo A.

<b>Arranjo A</b>	<b>Valor [R\$]</b>
Material	18.492, 15
Gel para Tratamento do Solo	888,80
Mão de Obra	17.324,40
Maquinário	1.550,00
<b>TOTAL</b>	<b>38.255,35</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 4. 5** Previsão de custos para instalação da malha de terra com tratamento do solo no arranjo B.

<b>Arranjo B</b>	<b>Valor [R\$]</b>
Material	33.515,82
Gel para Tratamento do Solo	2.688,62
Mão de Obra	25.680,30
Maquinário	2.050,00
<b>TOTAL</b>	<b>63.934,74</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destarte a explicação apresentada no item 4.4.5, foi simulada a redução da resistividade para os dois arranjos, porém o sistema apresentou os mesmos distúrbios caracterizados no arranjo B.

Como os valores de resistência estão sendo reduzidos proporcionalmente, os processos de estratificação reduzem de maneira similar, logo, as medidas estão aprovadas. A seguir, serão apresentados os resultados concernentes ao arranjo A para cada índice de redução sugerido. Os valores para os arranjos B estão registrados no Apêndice J.

#### **4.5.1 Redução de 25% da resistividade**

Aplicando a redução de 25% da resistência nos valores encontrados no terreno da Samambaia, os valores inseridos no TecAt Plus 6.3 são representados na Tabela 4.6.

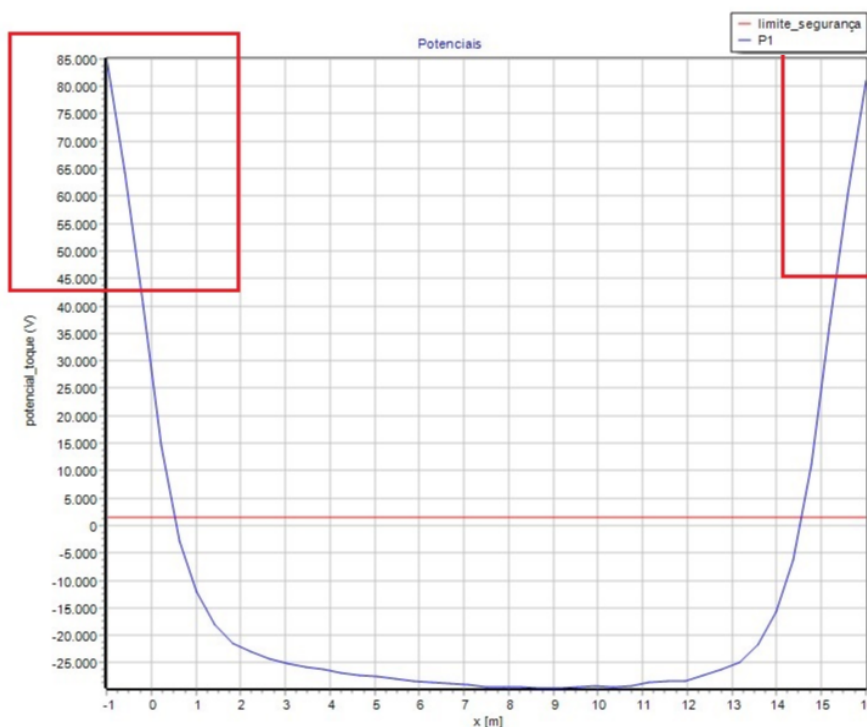
**Tabela 4. 6** Valores de resistência no terreno da Samambaia com redução de 25%.

Espaçamento a [m]	Resistencia elétrica medida com 25 % [ $\Omega$ ]					
	A	B	C	D	E	F
1	510,00	777,75	766,50	844,50	681,00	678,75
2	571,50	602,25	657,00	612,00	537,00	540,00
4	261,00	360,75	326,25	363,00	272,25	268,50
8	34,43	255,75	97,20	92,63	52,88	65,18
16	18,53	14,42	18,75	15,68	67,05	47,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

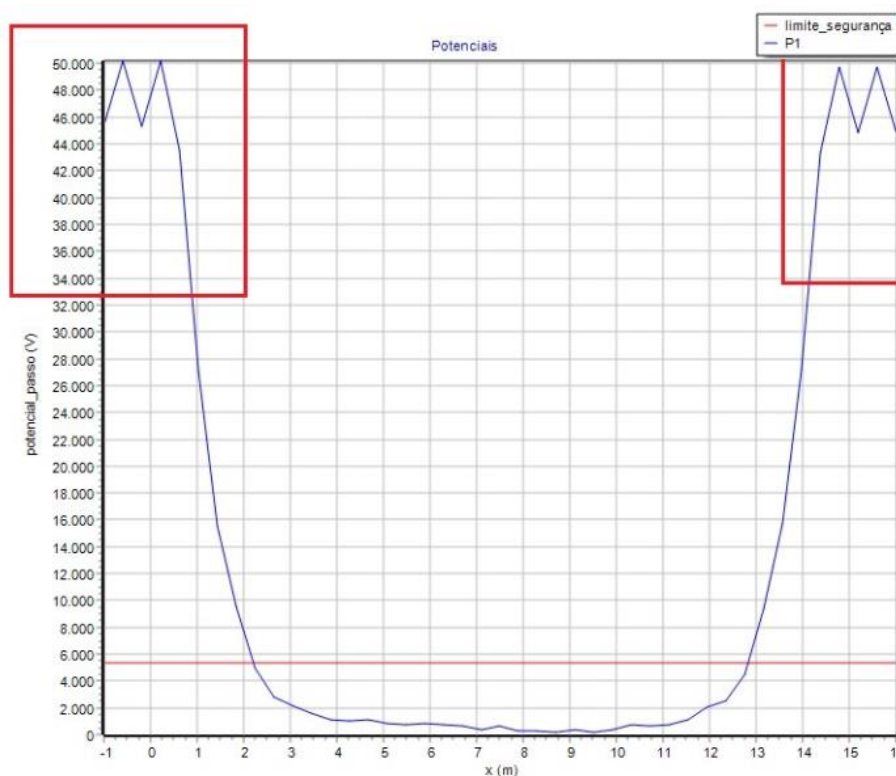
Realizado a estratificação e aplicação do arranjo A o terreno apresentou uma resistência de malha de 45,73 [ $\Omega$ ] conforme relatório apresentado no Apêndice J.

Os potenciais admissíveis são detalhados no Apêndice K, e são menores que o terreno sem tratamento, como esperado. Ambos potenciais de toque e passo permaneceram na faixa recomendada, apresentando redução nos valores e tensão na borda da malha ilustrada nas Figuras 4.25 e 4.26.

**Figura 4. 25** Potencial de toque no terreno da Samambaia com redução de 25%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 26** Potencial de passo no terreno da Samambaia com redução de 25%.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5.2 Redução de 50% da resistividade

Para o fator de 50% as resistências medidas foram reduzidas para os valores descritos na Tabela 4.7.

**Tabela 4. 7** Valores de resistência no terreno da Samambaia com redução de 50%.

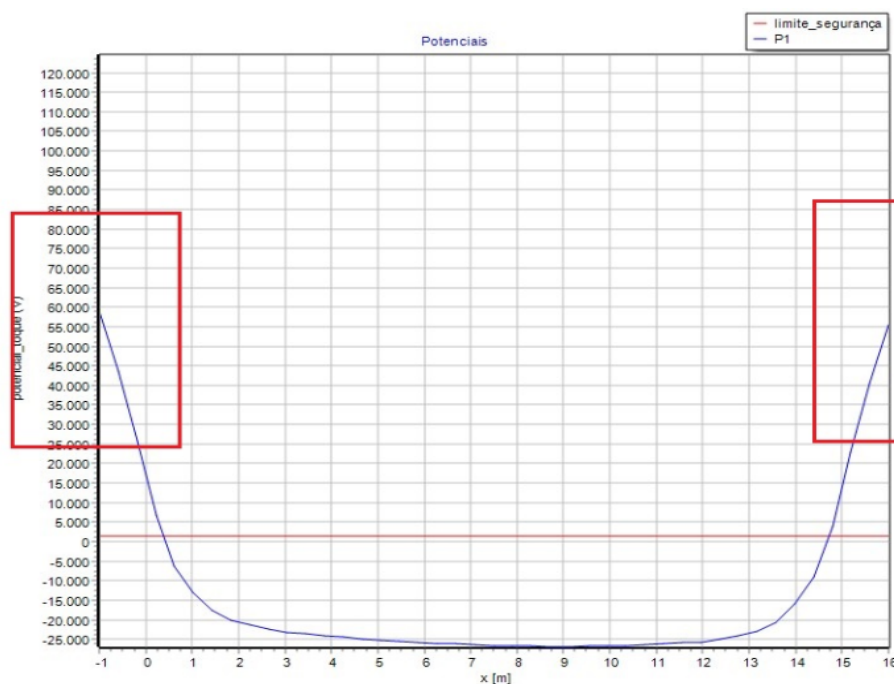
Espaçamento a [m]	Resistencia elétrica medida com 50 % [ $\Omega$ ]					
	A	B	C	D	E	F
1	340,00	518,50	511,00	563,00	454,00	452,50
2	381,00	401,50	438,00	408,00	358,00	360,00
4	174,00	240,50	217,50	242,00	181,50	179,00
8	22,95	170,50	64,80	61,75	35,25	43,45
16	12,35	9,62	12,50	10,45	44,70	31,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a estratificação do terreno, a resistência de malha reduziu para 30,86 [ $\Omega$ ], detalhado no Apêndice J.

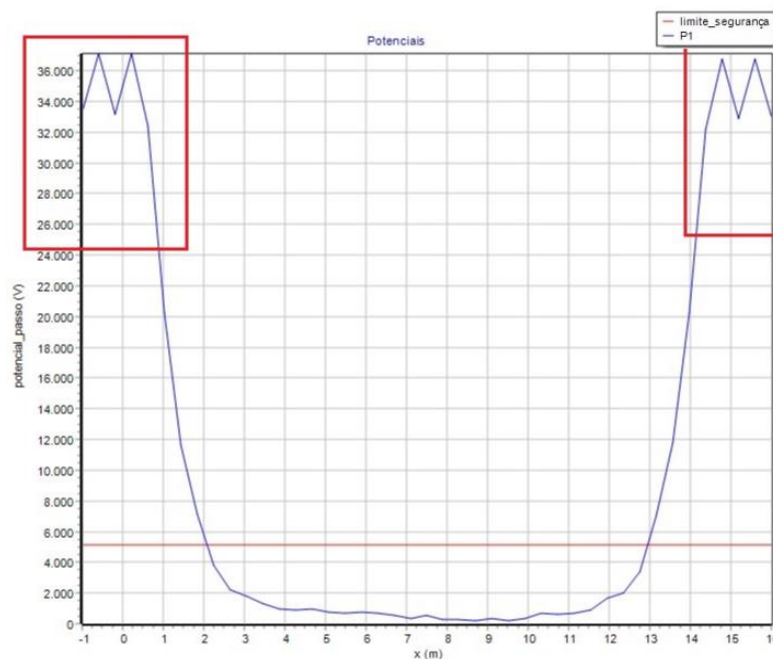
Os potenciais de toque e passo admissíveis decresceram e apresentaram menores valores de tensão nas bordas da malha, de acordo com o Apêndice K. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam os resultados.

**Figura 4. 27** Potencial de toque no terreno da Samambaia com redução de 50%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 28** Potencial de passo no terreno da Samambaia com redução de 50%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.5.3 Redução de 75% da resistividade

Os valores reduzidos para 75% das resistências estão registrados na Tabela 4.8. Mesmo após o tratamento químico, o solo na Samambaia apresenta maior resistência que no Senado Federal.

**Tabela 4. 8** Valores de resistência no terreno da Samambaia com redução de 75%.

Espaçamento a [m]	Resistencia elétrica medida com 75 % [ $\Omega$ ]					
	A	B	C	D	E	F
1	170,00	259,25	255,50	281,50	227,00	226,25
2	190,50	200,75	219,00	204,00	179,00	180,00
4	87,00	120,25	108,75	121,00	90,75	89,50
8	11,48	85,25	32,40	30,88	17,63	21,73
16	6,18	4,81	6,25	5,23	22,35	15,75

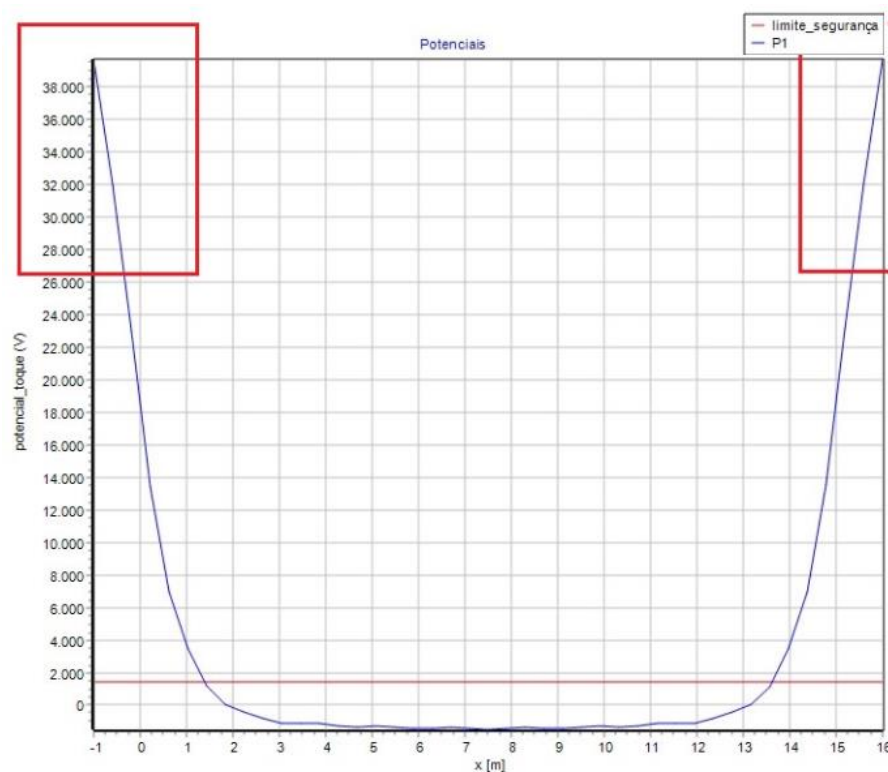
Fonte: Elaborado pelo autor.

A resistência de malha para este índice de redução ficou em 15,13 [ $\Omega$ ] valor que não atende os 10[ $\Omega$ ] recomendados pela (ABNT, 2015) e usualmente utilizado por engenheiros eletricitas em projetos de aterramento. O Apêndice J apresenta o relatório.

Diante das condições iniciais do terreno apresentada sem o tratamento, a resistência calculada pode ser considerada como satisfatória e adequada dadas, consoante (ABNT, 2013) nem sempre valores baixos de resistência asseguram malha de terra segura, logo é necessário à análise dos potenciais.

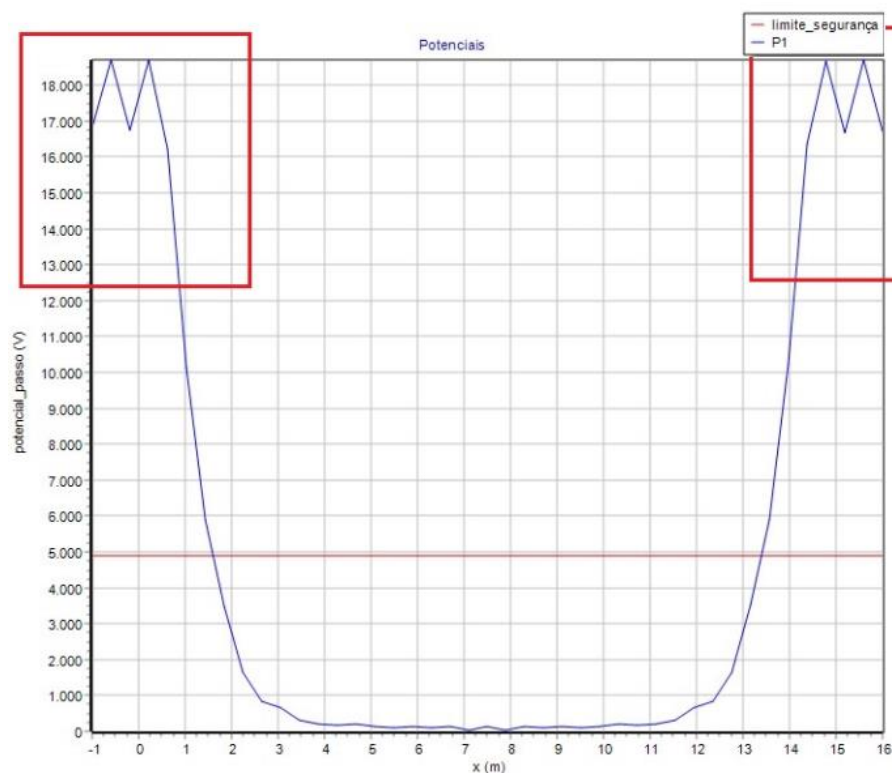
A redução nos potenciais admissíveis continuou, mas ainda permanecerão altos em comparação ao terreno do Senado Federal, ilustrado no Apêndice K. Os níveis de tensão ao redor da malha também reduziram na análise de toque e passo. As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam os resultados.

**Figura 4. 29** Potencial de toque no terreno da Samambaia com redução de 75%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4. 30** Potencial de passo no terreno da Samambaia com redução de 75%.



Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 4.6 Tratamento físico do solo no terreno da Samambaia

A (ABNT, 2015) recomenda a utilização de eletrodos naturais tanto para a descida de sistemas de proteção contra descarga atmosférica (SPDA) como para o aterramento.

Os eletrodos naturais são os elementos constituintes da estrutura de uma edificação, como as armaduras e concreto que as preenche. A utilização dos eletrodos naturais para o projeto de aterramento tem sido destacada nas últimas atualizações das normas brasileiras, sendo que há muitos anos já é difundida e utilizada no mundo. (COTRIM, 2009)

Para o tratamento físico do solo será utilizado uma fundação destinada a uma subestação rural de média tensão, projetada com base na técnica de confragem. (RESSUREIÇÃO, 2014)

Confragem é uma técnica de construção que consiste em estruturas pré-moldadas preenchidas de betão armado, comumente conhecido de concreto armado. (ENGENHARIA, 2018)

O concreto armado é composto de estruturas em aço metálico, dispostas de tal forma que torna a edificação resistente a tração e compressão, retratada na Figura 4.31. (ENGENHARIA, 2018)

**Figura 4. 31** Confragem da fundação para construção de subestação.



a. Gaiola da fundação



b. Processo de britagem da fundação

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (RESSUREIÇÃO, 2014).

O projeto de fundação proposto por (RESSUREIÇÃO, 2014), possui dimensões de 16,98m x 13,88m, medidas próximas à da subestação proposta no trabalho.

A Tabela 4.9 apresenta os dados concernentes às vigas calculadas para fundação, enquanto a Figura 4.32 ilustra o croqui. As cores na Tabela 4.9 ilustram as respectivas vigas na Figura 4.32.

Lembrando que o intuito deste projeto não é dimensionar uma subestação, logo, o exemplo serve de ilustração para conceituar o impacto da utilização de eletrodos naturais em projetos de aterramento.

#### **4.6.1 Fundação apresentando 90 $\Omega.m$**

A resistência de malha apresentada foi de 6,56 [ $\Omega$ ], conforme aplicação da Equação 42 abaixo. O valor encontrado já satisfaz as condições de segurança propostas, se aproximando da resistência final encontrada no Senado Federal.

$$R_m = \frac{\rho_c}{1,57\pi\sqrt[3]{V}} \rightarrow R_m = \frac{90}{1,57\pi\sqrt[3]{21,46}} \rightarrow R_m = 6,56 [\Omega]$$

#### **4.6.2 Fundação apresentando 60 $\Omega.m$**

Para a fundação proposta com uma resistividade de 60 [ $\Omega.m$ ], a resistência de malha calculada foi de 4,38 [ $\Omega$ ], conforme procedimentos abaixo.

$$R_m = \frac{\rho_c}{1,57\pi\sqrt[3]{V}} \rightarrow R_m = \frac{60}{1,57\pi\sqrt[3]{21,46}} \rightarrow R_m = 4,38 [\Omega]$$

#### **4.6.3 Fundação apresentando 30 $\Omega.m$**

Para a fundação de 30 [ $\Omega.m$ ] o terreno apresentou uma resistência de malha de 2,19 [ $\Omega$ ], detalhado a seguir.

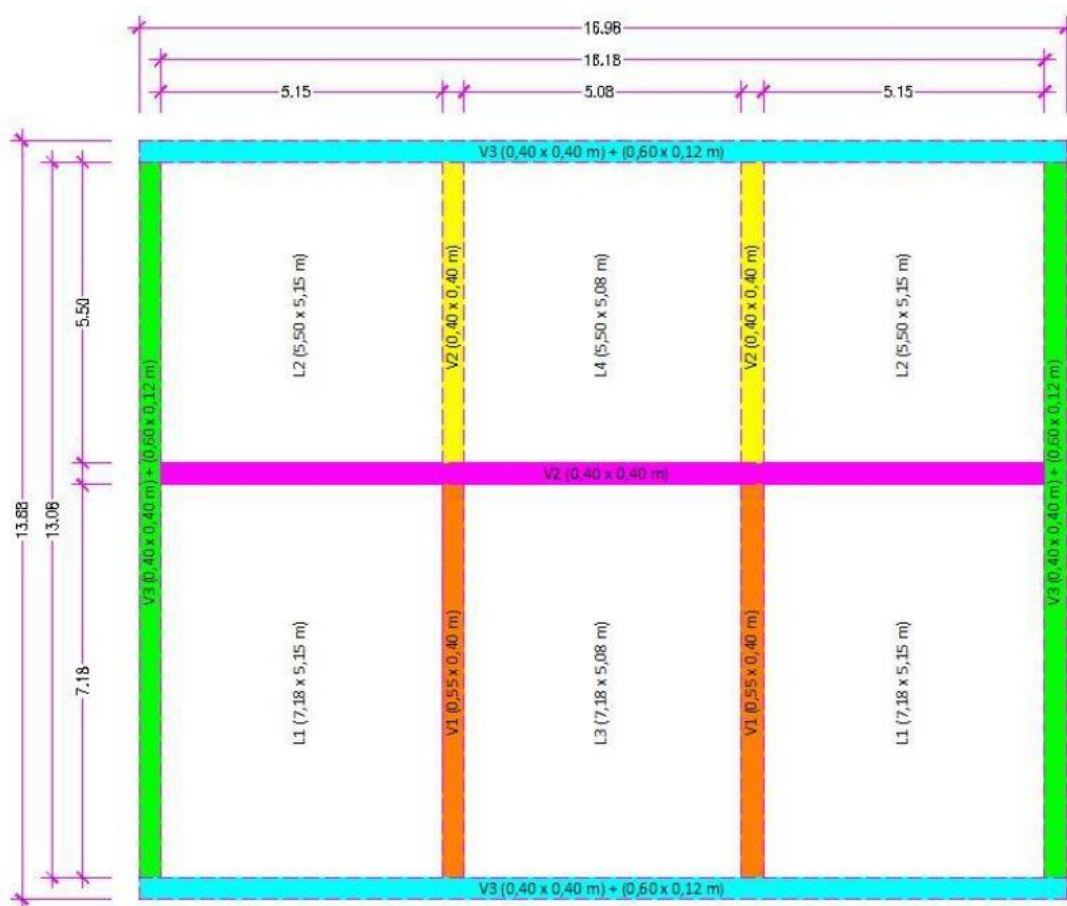
$$R_m = \frac{\rho_c}{1,57\pi\sqrt[3]{V}} \rightarrow R_m = \frac{30}{1,57\pi\sqrt[3]{21,46}} \rightarrow R_m = 2,19 [\Omega]$$

Neste último caso a malha aterrada com a utilização dos eletrodos naturais, apresentou uma resistividade inferior ao terreno do Senado Federal, sem a utilização de qualquer técnica que demandasse custo e refletisse no valor total da execução da subestação.

**Tabela 4. 9** Dados referentes à estrutura de fundação da subestação.

Vigas	Comprimento da viga a bitonar [m]	Número de vigas na fundação	Estimativa do volume de concreto [m <sup>3</sup> ]
V1 (0,40m x 0,55m)	7,18	2	3,16
V2 (0,40m x 0,40m)	16,18	1	2,59
	5,50	2	1,76
V3 (0,40m x 0,40m) + (0,60m x 0,12m)	16,98	2	7,88
	13,08	2	6,07
<b>TOTAL DE CONCRETO</b>			<b>21,46</b>

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (RESSUREIÇÃO, 2014).

**Figura 4. 32** Croqui da fundação referente a subestação.

Fonte: Adaptado pelo autor obra de (RESSUREIÇÃO, 2014).

#### **4.7 Avaliação dos tratamentos propostos**

Mesmo com o tratamento do solo com produtos químicos e considerando o maior índice de redução, a resistência apresentada pelo terreno na Samambaia permanece maior que no Senado Federal, terreno este que vem sendo tratado por anos e que tem sua estrutura mineral já salientada com elementos mais condutivos.

Na prática, a redução da resistividade nem sempre pode ocorrer de maneira satisfatória por diversos fatores, desde condições climáticas, características do solo até o modo incorreto de aplicação do produto.

O tratamento químico corresponde a um adicional no custo da obra, sendo uma solução temporária, que com o tempo deve ser reposta. Conclui-se que, no comparativo, a melhor alternativa seria utilizar a fundação da própria subestação.

A utilização da fundação apresentou resistências de malha menor em comparação ao tratamento químico, além de representar uma economia no custo de implementação já que serão utilizadas as próprias ferragens como elementos da malha.

Devido à topologia dos eletrodos naturais, quando ocorre uma corrente de falta, a resistência de impulso perante o pulso de corrente é considerada menor que a resistência de malha, proporcionando ao sistema maior facilidade de escoamento e consequentemente menores potenciais na malha. (COTRIM, 2009)

Portanto, para subestações em fase de construção, o mais recomendado é a utilização da fundação. Em casos onde a subestação já está implementada, deverá ser analisado a resistividade do solo e feito um comparativo para avaliar se o tratamento químico será ou não viável.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentará as conclusões da metodologia proposta para os terrenos analisados no dimensionamento da malha de terra utilizando o TecAt Plus 6.3, conclusões do autor e propostas de trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

O conceito de aterramento é item fundamental para profissionais na área de engenharia elétrica, apesar da importância, o assunto é tratado displicentemente.

Neste cenário, a técnica de aterramento tende a se tornar mais expressiva, primeiro pela necessidade dos usuários e instalações, segundo por normatizações específicas e intensificação dos meios de fiscalização.

Motivado pela carência de conteúdo e o apreço pela área, este trabalho apresentou uma metodologia adequada de aterramento, exemplificado em uma subestação comercial.

Para a exequibilidade adequada de qualquer instalação elétrica, que garanta segurança contra riscos de acidentes fatais, a subestação deve possuir um sistema de aterramento compatível com o projeto, de acordo com (MAMEDE FILHO, 2017).

Compreender os diversos tipos de haste de aterramento, saber aplicá-la consoante ao terreno que abrigará a subestação, é fator determinante na eficiência da malha projetada.

Foi verificado a interferência do solo no dimensionamento da malha, utilizando o *software* de uso profissional TecAt Plus 6.3 e proposto alternativas para redução dos parâmetros encontrados.

Durante a concepção do projeto foi necessária atenção para, dimensões do terreno, características do terreno, resistividade do solo, arranjo de malha proposto, resistência de malha e potenciais.

Assim, foram escolhidos dois terrenos com localidade, destinação e resistividade distinta, para dimensionamento da malha. Aplicado dois arranjos com estrutura e elementos diferentes, para comparar o custo benefício em cada um deles.

Conforme os dimensionamentos realizados no TecAt Plus 6.3, ficou claro que a resistência de malha e potenciais no terreno do Senado Federal seriam menores que na Samambaia, devido as resistências dos solos mensuradas.

Independente do arranjo de malha aplicada aos terrenos, dada as características minerais do solo, o terreno no Senado Federal possui elementos mais condutivos, o que facilitará o escoamento da corrente de defeito ou qualquer outro sinistro que ocorrer na subestação.

Após as análises entre os dois arranjos propostos, ficou claro que nem sempre a adição de mais elementos provoca uma redução significativa nos parâmetros de resistência de malha e potenciais.

Na aplicação do arranjo B, com eletrodos em todas as interconexões da malha, a redução dos parâmetros analisados em comparação com o investimento demandado foi irrisória.

Segundo (LEITE; PEREIRA FILHO,2007) o superdimensionamento de uma malha só acarreta desperdício de dinheiro e tempo. Percebe-se que redução dos *meshs* é uma alternativa para a redução dos potenciais de passo, gerando economia através do encurtamento de cabos, conexões e hastes.

Como alternativa aos altos valores de resistência de malha e potenciais encontrados na Samambaia, foi proposto a aplicação de tratamento químico e físico aos terrenos.

Foram simulados no TecAt Plus 6.3 as reduções apresentadas pelo gel químico, onde no melhor índice de redução o valor de resistência de malha permaneceu acima do limite recomendado de 10[Ω]. Este tratamento é caro e necessita de reposição periódica para manter sua eficiência.

Em contrapartida, o pior índice de resistividade da fundação no tratamento físico, apresentou resistência de malha e potenciais dentro dos limites recomendados, gerando custo algum para sua aplicação já que está intrínseco na instalação da subestação.

Apesar das dificuldades encontradas no levantamento de bibliografia adequada, medições da resistência no terreno da Samambaia, do aprendizado na

utilização do TecAt Plus 6.3 e simulações realizadas no *software*, os objetivos propostos foram todos alcançados.

## 5.2 Proposta de Trabalhos Futuros

Baseado no tema de aterramento e contexto do trabalho apresentado, sugere-se os seguintes temas para estudo, pesquisa e implementação no futuro.

1. Otimização da Malha de Aterramento por meio dos *Meshs*: Pesquisa e simulação de malhas no TecAt Plus 6.3, que propiciem a redução da resistência e potenciais.
2. Readequação de Sistema de Aterramento: Estudo de caso baseado em uma instalação de baixa, média ou alta tensão que possua um modelo de aterramento, porém, o mesmo apresente ineficiência ou esteja em desacordo com a NBR 15751 vigente no período.
3. Tratamento Químico para Aterramento em Solos Arenosos: Estudo que procurará viabilizar o aterramento em solos com característica arenosa sob tratamento químico, de modo que as pesquisas e ensaios possibilitem técnicas mais eficientes e/ou melhoria nos produtos utilizados.
4. Utilização da Fundação para Aterramento em Edifício Comercial: Pesquisa para verificar a viabilidade da fundação, aplicada ao aterramento de um edifício comercial, que não possui o sistema de proteção ou tem seu aterramento acima dos limites de segurança normatizados.
5. Redução do Potencial de Periferia Utilizando o TecAt Plus 6.3: Propor metodologia para subestação aplicando *software* de aterramento e eletrodos passivos para equipotencialização de equipamentos metálicos periféricos.

## REFERÊNCIAS

- AMBAR energia. **Operação Vale do São Bartolomeu**. 2018. Disponível em: <<http://ambarenergia.com.br/areas-de-atuacao/vale-do-sao-bartolomeu/>>. Acesso em: 19 ago 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE (ABRACOPEL). **Anuário estatístico brasileiro dos acidentes de origem elétrica**: ano base 2017. São Paulo, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14039**: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 KV. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15749**: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15751**: Sistema de aterramento de subestação. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5419**: Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.
- BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS PARA ENSINO E PESQUISA (BDMEP). **Dados históricos**: Estação 83377 Brasília - DF. INMET, 2018. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/gera\\_serie\\_txt.php?&mRelEstacao=83377&btnProcesso=serie&mRelDtInicio=19/09/2017&mRelDtFim=20/09/2017&mAtributos=,,1,1,,,,,,1,,1,1](http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/gera_serie_txt.php?&mRelEstacao=83377&btnProcesso=serie&mRelDtInicio=19/09/2017&mRelDtFim=20/09/2017&mAtributos=,,1,1,,,,,,1,,1,1)>. Acesso em: 20 out 2018.
- COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2009.
- CREDER, H. **Instalações elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- CRUZ, E. C. A.; ANICETO, L. A; **Instalações elétricas**: fundamentos, prática e projetos em instalações residenciais e comerciais. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**: boletim técnico nº 53. Rio de Janeiro: SNLCS, 1978.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Brasília: Embrapa Solos, 2006.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2017**: ano base 2016. Brasília, 2017.
- ENGENHARIA civil. **Dicionário técnico**. Disponível em: <<https://www.engenhariacivil.com/dicionario/tag/betao-armado>>. Acessado em: 12 nov 2018.



FALANDO de viagem. **Como é o clima de Brasília?**. 2015. Disponível em: <<https://www.falandodeviagem.com.br/viewtopic.php?f=152&t=12223>>. Acesso em: 13 out 2018.

FASTWELD. **Dados técnicos sobre o gel de aterramento**. 2018. Disponível em: <<https://fastweld.com.br/produtos/183/fastgel.html>>. Acesso em: 11 nov 2018.

FC locações. **Orçamento máquina perfuratriz**. 2018. Disponível em: <<https://www.fclocacoesdf.com.br/>>. Acesso: 03 dez 2018.

FERRAMENTAS gerais. **Haste para aterramento ¾ X 3,0 m – Magnet**. 2018. Disponível em: < <https://www.fg.com.br/haste-para-aterramento-3-4x30m---magnet/p> >. Acesso em: 01 dez 2018.

FLORES, A. J. M. **Análise e aplicação de métodos para o cálculo da resistência de terra em sistemas com n eletrodos instalados em solos heterógenos**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), FEUP, Universidade do Porto. Porto, 2014.

FRANÇA, R. C. **Projeto de modernização de subestação consumidora**. 2012. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

GEBRAM, A.P. **Manutenção e operação de equipamentos de subestações**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

GOOGLE. **Mapa**: QN 301 Samambaia. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-15.8775721,48.0885185,3a,60y,194.61h,94.43t/data=!3m6!1e1!3m4!1sSOc-Wflmt6baRCi9yCmOvA!2e0!7i13312!8i6656>>. Acesso em: 24 set 2018.

GOOGLE. **Mapa**: Senado Federal, Praça dos Três Poderes. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-15.7988364,-47.8632209,581m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 20 out 2018.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (GDF). **Geografia de Brasília**. 2018. Disponível em: <<http://www.df.gov.br/333/>>. Acesso em: 21 out 2018.

GRAZIANO, N. **Instalação de cubículos de média tensão ao tempo**. O Setor Elétrico, 2018. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/instalacao-de-cubiculos-de-media-tensao-ao-tempo/>>. Acesso em: 19 ago 2018.

HABITISSIMO. **Apresentação de serviços executados pela Habitissimo**. 2018. Disponível em: <[https://fotos.habitissimo.com.br/foto/cabines-primarias-e-secundarias\\_1495716](https://fotos.habitissimo.com.br/foto/cabines-primarias-e-secundarias_1495716)>. Acesso em: 19 ago 2018.

INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS (IEEE). **Std 80-2000**: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Nova York, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Estações convencionais**: Brasília – DF. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 20 out 2018.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J.M. **Aterramento elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: SAGRA – D.C. LUZZATTO, 1995.

LEITE, C.M.; PEREIRA FILHO, M.L. **Malhas de terra: técnicas de aterramentos elétricos**. São Paulo: Officina de mydia, 2007.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MARIDO de aluguel Joinville. **Um bom aterramento faz a diferença em épocas de chuvas e raios?**. 2018. Disponível: <http://www.maridodealugueljoinville.com.br/um-bom-aterramento-faz-diferenca-em-epocas-de-chuvas-e-raios/>. Acesso em: 01 dez 2018.

MEGABRAS. **Terrômetro digital**. 2017. Disponível em: <https://www.megabras.com/pt-br/produtos/terrometro/terrometro-digital-MTD20KWe.php>. Acesso em: 30 set 2018.

MODENA, J.; SUETA, H. **Fascículo: aterramentos elétricos**. O Setor Elétrico, 2011

MONTAL. **Dados técnicos: MON-752 Composto químico terra gel** 2018. Disponível em: <http://www.montal.com.br/captor-franklin-terminais-aereos-postes-mastros-suportados-mastros-cabos-aco-sinalizadores-conectores-barra-chata-de-aluminio/aterramento/tratamento-quimico/mon-752-composto-qu%C3%ADmico-terra-gel-detail.html>. Acesso em: 11 nov 2018.

OFFICINA de mydia. **Manual TecAt Plus 6**. 2016. Disponível em: [http://www.mydia.com/grounding/grounding\\_tecat.htm](http://www.mydia.com/grounding/grounding_tecat.htm). Acesso em: 14 out 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA (ONS). **Sumário de programa mensal de operação: semana de 12/05/2018 a 18/05/2018**. 2018. Disponível em: [http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/SUMARIO\\_EXECUTIVO\\_PMO\\_201805\\_RV2.pdf](http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/SUMARIO_EXECUTIVO_PMO_201805_RV2.pdf). Acesso em: 14 ago 2018.

RESSUREIÇÃO, R. J. E. **Projeto e construção de subestações**. 2014. 199 f. Relatório de estágio (Mestrado em Engenharia Civil), Área Departamental de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2014.

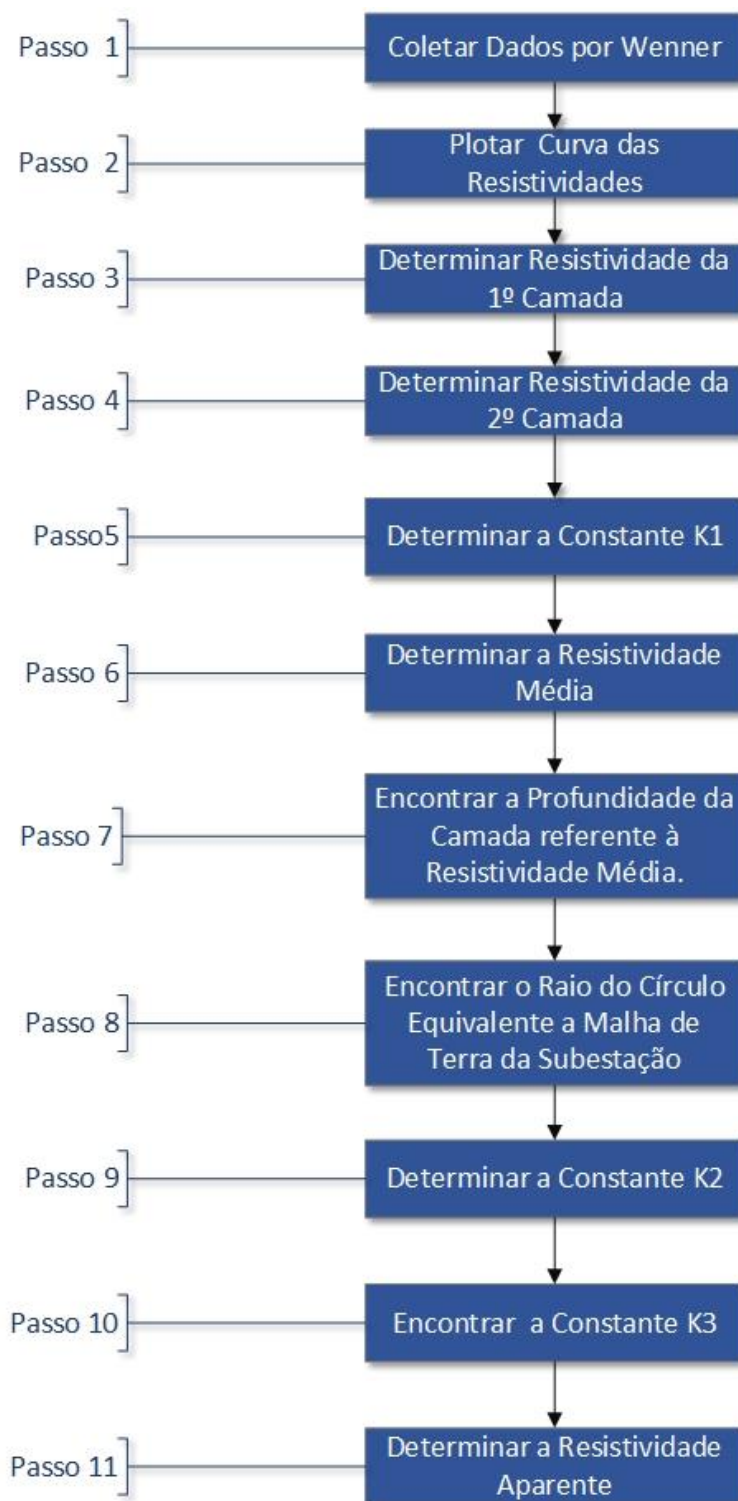
SAMAMBAIA Distrito Federal. **Sobre Samambaia DF**. 2009. Disponível em: <http://samambaiadf.blogspot.com/2011/04/sobre-samambaia-df.html>. Acesso em: 30 set 2018.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Latossolos**. Agência de Informação Embrapa, 2018. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_96\\_10112005101956.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html). Acesso em: 21 out 2018.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição, instrumentação e filosofia de aterramento**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

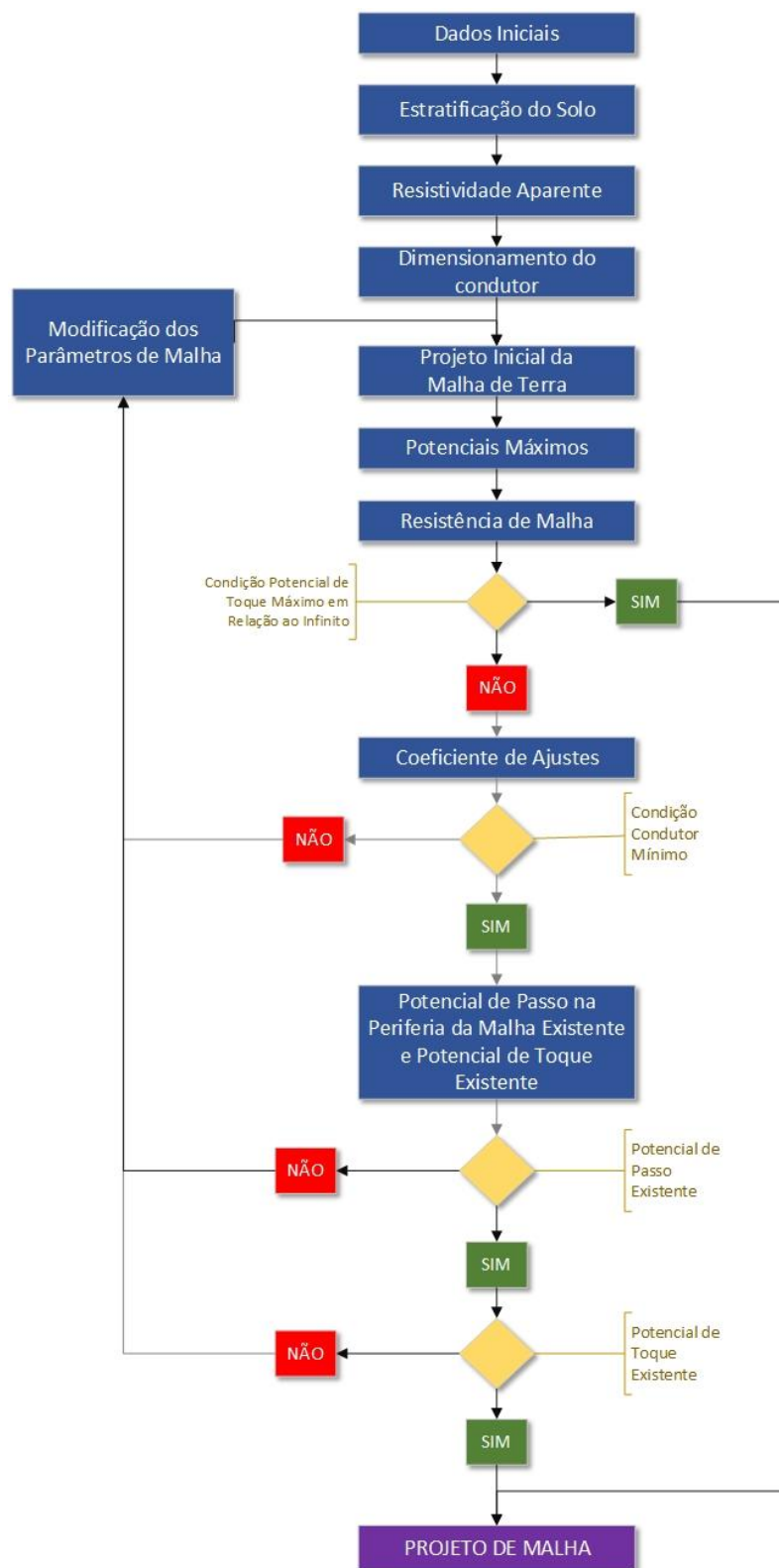
## APÊNDICES

### Apêndice A – Método simplificado de estratificação em duas camadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

## Apêndice B – Dimensionamento de uma malha de aterramento para subestação de média tensão



Fonte: Elaborado pelo autor.

## Apêndice C – Fotos do 1º terreno: Senado Federal



Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.



## Apêndice D – Fotos do 2º terreno: Samambaia



Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.



## Apêndice E – Equipamentos e ferramentas utilizados na medição

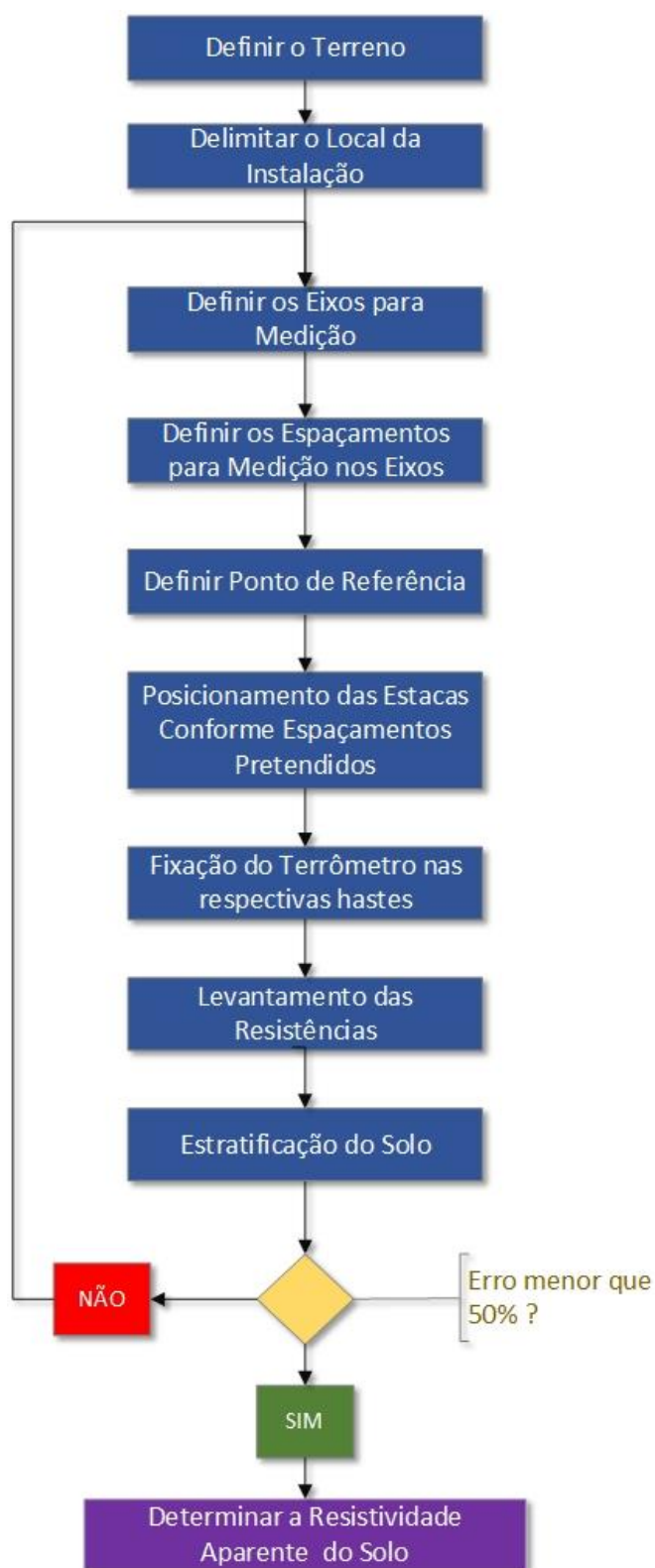


Fonte: Elaborado pelo autor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

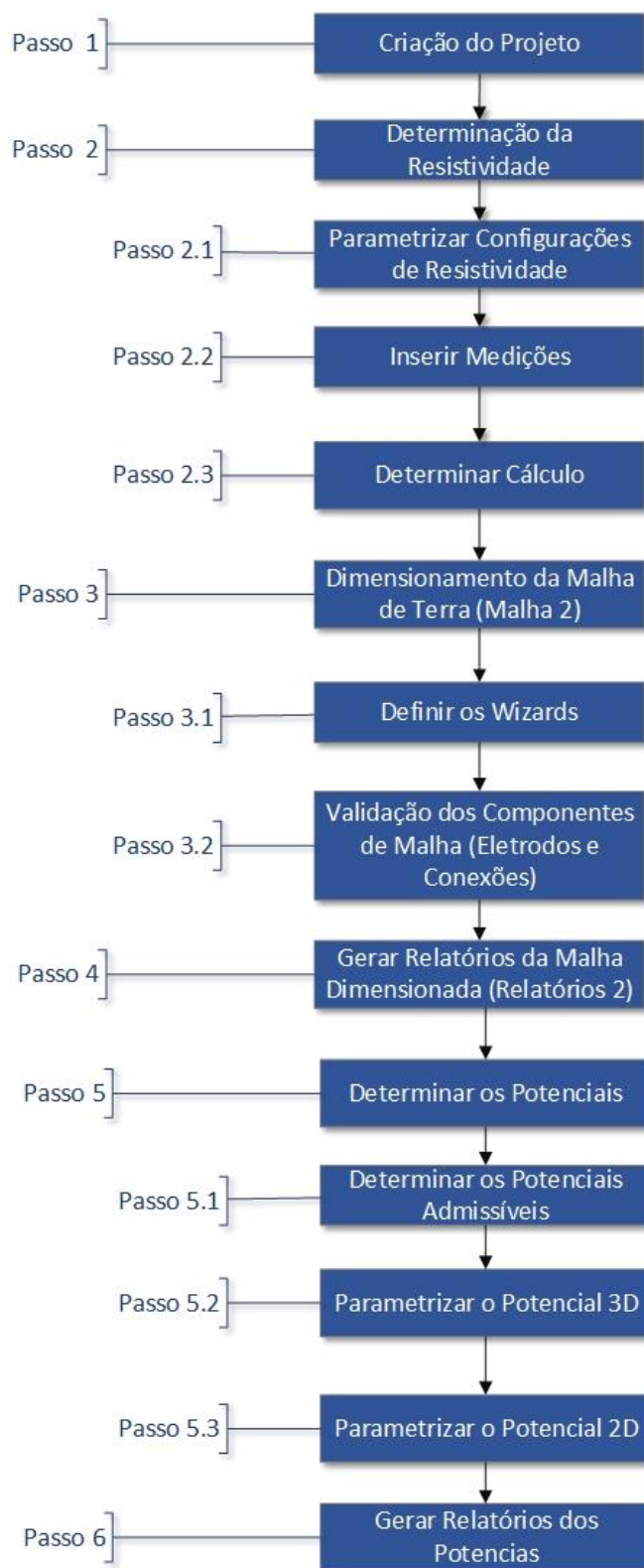


**Apêndice F – Procedimento para determinação da resistência do solo**

Fonte: Elaborado pelo autor.



## Apêndice G – Processos de simulação no TecAt Plus 6



Fonte: Elaborado pelo autor.

## Apêndice H – Resistência de malha para o 1º terreno: Senado Federal

Dados do Projeto:

Projeto: TCC LUIDI FILIPE - TERRENO 1

Cliente: UNICEUB

Data: 20/09/2017

Local: SENADO FEDERAL

Alternativa	Arranjo	Resultado
Original	A	Resistência da Malha [Ohm] = 4,36 Máximo potencial da Malha [V] = 109928,78
	B	Resistência da Malha [Ohm] = 4,25 Máximo potencial da Malha [V] = 106997,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

## Apêndice I – Potenciais admissíveis para o 1º terreno: Senado Federal

Alternativa	Resultado
Original	<div> Potencial de Toque admissível [V]: 1363,31  Potencial de Passo admissível [V]: 4593,33 </div>

Fonte: Elaborado pelo autor.

## Apêndice J – Resistência de malha para o 2º terreno: Samambaia

### Dados do Projeto:

Projeto: TCC LUIDI FILIPE - TERRENO 2

Cliente: UNICEUB

Data: 29/09/2018

Local: SAMAMBAIA

Alternativa	Arranjo	Resultado
Original	A	Resistência da Malha [Ohm] = 61,11 Máximo potencial da Malha [V] = 1539937,88
	B	Resistência da Malha [Ohm] = 60,87 Máximo potencial da Malha [V] = 1533891,93
Tratamento do solo 25%	A	Resistência da Malha [Ohm] = 45,73 Máximo potencial da Malha [V] = 1152437,08
	B	Resistência da Malha [Ohm] = 45,55 Máximo potencial da Malha [V] = 1147853,71
Tratamento do solo 50%	A	Resistência da Malha [Ohm] = 30,86 Máximo potencial da Malha [V] = 777596,31
	B	Resistência da Malha [Ohm] = 30,43 Máximo potencial da Malha [V] = 766945,85
Tratamento do solo 75%	A	Resistência da Malha [Ohm] = 15,13 Máximo potencial da Malha [V] = 381287,79
	B	Resistência da Malha [Ohm] = 14,57 Máximo potencial da Malha [V] = 367225,91

Fonte: Elaborado pelo autor.

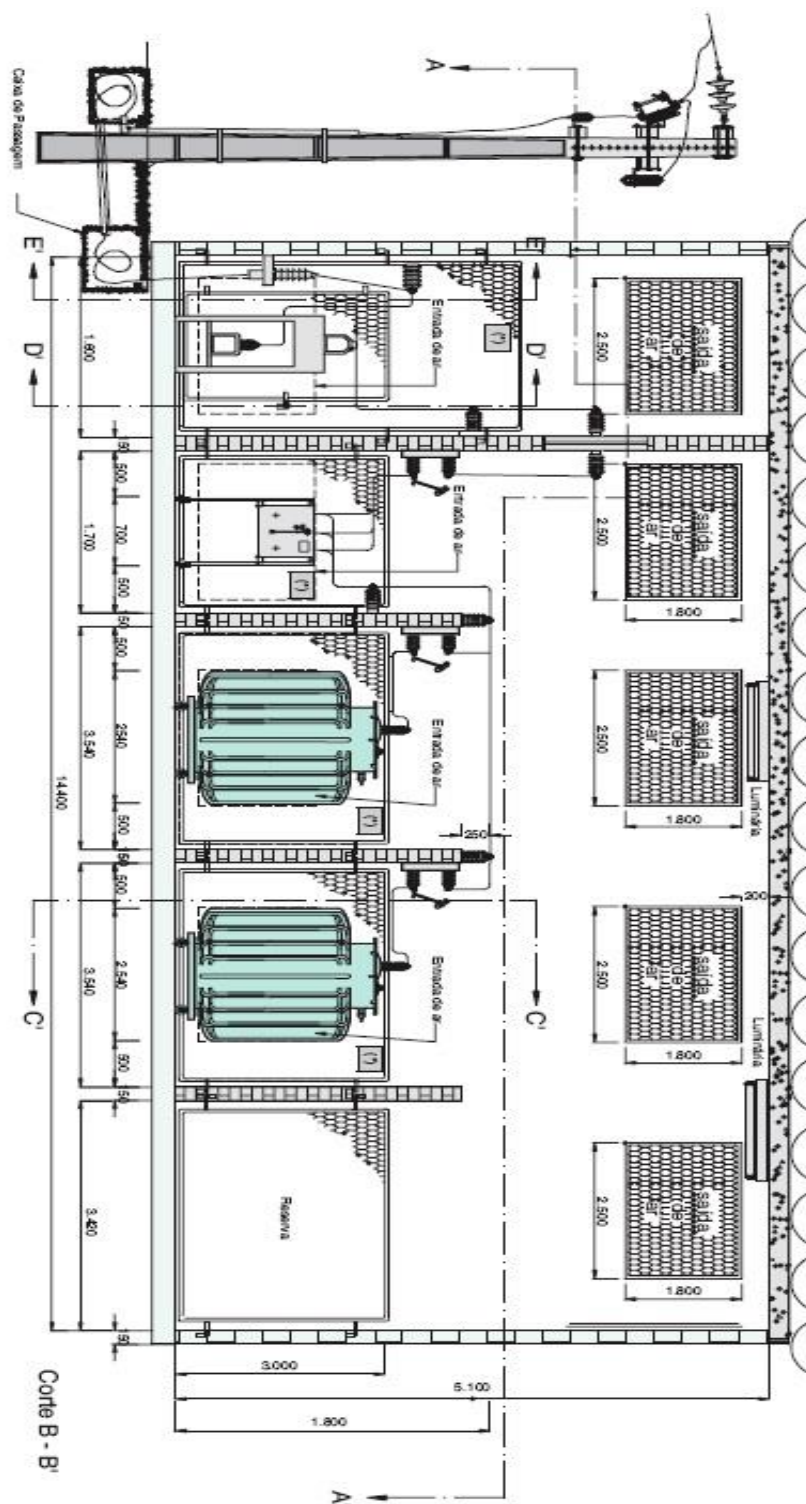
### Apêndice K – Potenciais admissíveis para o 2º terreno: Samambaia

Alternativa	Resultado
Original	<div> Potencial de Toque admissível [V]: 1576,53  Potencial de Passo admissível [V]: 5446,19 </div>
Tratamento do solo 25%	<div> Potencial de Toque admissível [V]: 1546,41  Potencial de Passo admissível [V]: 5325,71 </div>
Tratamento do solo 50%	<div> Potencial de Toque admissível [V]: 1497,14  Potencial de Passo admissível [V]: 5128,62 </div>
Tratamento do solo 75%	<div> Potencial de Toque admissível [V]: 1437,08  Potencial de Passo admissível [V]: 4888,41 </div>

Fonte: Elaborado pelo autor.

## ANEXOS

### Anexo A – Planta da subestação: Vista frontal



Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.



**Anexo C – Tabela para cálculo do parâmetro  $K_1$** 

Relação $\rho_1/\rho_2$	Fator $K_1$ ,	Relação $\rho_1/\rho_2$	Fator $K_1$ ,	Relação $\rho_1/\rho_2$	Fator $K_1$ ,	Relação $\rho_1/\rho_2$	Fator $K_1$ ,
0,0010	0,6839	0,3000	0,8170	6,500	1,331	19,00	1,432
0,0020	0,6844	0,3500	0,8348	7,000	1,340	20,00	1,435
0,0025	0,6847	0,4000	0,8517	7,500	1,349	30,00	1,456
0,0030	0,6850	0,4500	0,8676	8,000	1,356	40,00	1,467
0,0040	0,6855	0,5000	0,8827	8,500	1,363	50,00	1,474
0,0045	0,6858	0,5500	0,8971	9,000	1,369	60,00	1,478
0,0050	0,6861	0,6000	0,9107	9,500	1,375	70,00	1,482
0,0060	0,6866	0,6500	0,9237	10,000	1,380	80,00	1,484
0,0070	0,6871	0,7000	0,9361	10,500	1,385	90,00	1,486
0,0080	0,6877	0,7500	0,9480	1,000	1,390	100,00	1,488
0,0090	0,6882	0,8000	0,9593	11,500	1,394	110,00	1,489
0,0100	0,6887	0,8500	0,9701	12,000	1,398	120,00	1,490
0,0150	0,6914	0,9000	0,9805	12,500	1,401	130,00	1,491
0,0200	0,6940	0,9500	0,9904	13,000	1,404	140,00	1,492
0,0300	0,6993	1,000	1,0000	13,500	1,408	150,00	1,493
0,0400	0,7044	1,500	1,0780	14,000	1,410	160,00	1,494
0,0500	0,7095	2,000	1,1340	14,500	1,413	180,00	1,495
0,0600	0,7145	2,500	1,1770	15,000	1,416	200,00	1,496
0,0700	0,7195	3,000	1,2100	15,500	1,418	240,00	1,497
0,0800	0,7243	3,500	1,2370	16,000	1,421	280,00	1,498
0,0900	0,7292	4,000	1,2600	16,500	1,423	350,00	1,499
0,1000	0,7339	4,500	1,2780	17,000	1,425	450,00	1,500
0,1500	0,7567	5,000	1,2940	17,500	1,427	640,00	1,501
0,2000	0,7781	5,500	1,3080	18,000	1,429	1.000,00	1,501
0,2500	0,7981	6,000	1,3200	18,500	1,430		

Fonte: MAMEDE FILHO, 2017.

### Anexo D – Determinação da resistividade aparente a partir do fator $K_3$

$\frac{R}{H_m}$	Relação $\rho_1/\rho_2$												
	0,01	0,05	0,10	0,20	0,50	1	2	5	10	20	50	100	200
	Relação $\rho_1/\rho_2$												
0,10	1,00	1,01	1,01	1,02	1,05	1,00	1,10	1,15	1,18	1,2	1,2	1,3	1,3
0,20	0,95	0,96	1,00	0,97	0,99	1,00	1,13	1,20	1,25	1,3	1,4	1,4	1,5
0,50	0,80	0,90	0,98	0,95	1,00	1,00	1,20	1,30	1,40	1,6	1,8	2,0	2,3
1,0	0,77	0,83	0,90	0,85	0,90	1,00	1,30	1,50	1,60	2,0	2,5	2,8	3,0
2,0	0,67	0,82	0,86	0,86	0,90	1,00	1,31	1,55	1,60	2,6	3,2	4,0	4,5
5,0	0,56	0,60	0,65	0,68	0,80	1,00	1,32	2,00	2,90	4,0	5,7	7,3	8,8
10	0,48	0,52	0,60	0,60	0,80	1,00	1,35	2,40	3,50	5,3	8,0	11,0	14,0
20	0,41	0,45	0,50	0,53	0,72	1,00	1,40	2,70	4,20	6,8	12,0	15,0	21,0
35	0,36	0,40	0,45	0,50	0,71	1,00	1,40	2,80	4,80	7,8	14,0	18,0	27,0
50	0,32	0,37	0,40	0,48	0,70	1,00	1,50	3,10	5,40	8,5	16,0	23,0	33,0
75	0,29	0,35	0,38	0,46	0,68	1,00	1,50	3,10	5,50	9,0	17,0	26,0	40,0
100	0,27	0,31	0,35	0,42	0,55	1,00	1,50	3,20	5,80	9,8	18,0	39,0	45,0
200	0,22	0,26	0,30	0,38	0,60	1,00	1,60	3,50	6,00	11,0	22,0	35,0	56,0
500	0,18	0,21	0,25	0,35	0,60	1,00	1,70	3,70	6,70	12,0	25,0	42,0	77,0
1000	0,15	0,17	0,22	0,30	0,60	1,00	1,80	4,00	7,00	13,0	37,0	48,0	85,0

Fonte: MAMEDE FILHO, 2017

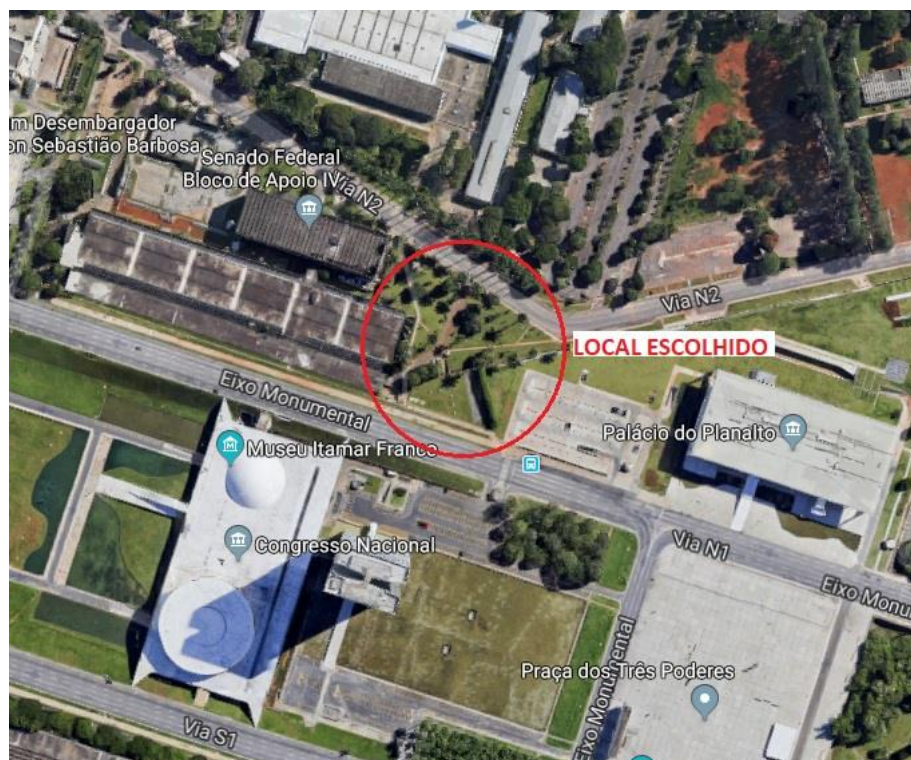


## Anexo E – Características dos condutores de aço cobreado

Forma $N \times AWG$	Diâmetro Nominal [mm]	Seção [m <sup>2</sup> ]	Resistencia [Ω/m]		Carga de ruptura [kg]		Corrente de Fusão	
			40%	30%	40%	30%	40%	30%
19 × 5	23,10	318,70	0,1399	0,1865	11.200	13.400	104.000	93.000
19 × 6	20,60	252,70	0,1764	0,2352	889	10.700	83.000	74.000
19 × 7	18,30	200,40	0,2224	0,2966	7.030	8.440	66.000	58.000
19 × 8	16,30	159,00	0,2805	0,3740	5.580	6.710	52.000	46.000
19 × 9	14,50	126,10	0,3537	0,4715	4.430	5.310	41.000	37.000
7 × 4	15,60	148,10	0,3000	0,3999	5.220	6.260	49.000	43.000
7 × 5	13,90	117,40	0,3783	0,5043	4.130	4.940	38.000	34.000
7 × 6	12,30	93,10	0,4770	0,6358	3.270	3.930	31.000	27.000
7 × 7	11,00	73,87	0,6014	0,8018	2.600	3.120	24.000	22.000
7 × 8	9,78	58,56	0,7585	1,0110	2.060	2.470	19.000	17.000
7 × 9	8,71	46,44	0,9564	1,2750	1.630	1.950	15.200	13.500
7 × 10	7,77	36,83	1,2060	1,6080	1.290	1.550	12.000	10.700
3 × 5	9,96	50,32	0,8809	1,1740	1.770	2.120	16.500	14.700
3 × 6	8,86	39,90	1,1110	1,4810	1.400	1.700	13.000	11.600
3 × 7	7,90	31,65	1,4010	1,8670	1.110	1.330	10.600	9.200
3 × 8	7,04	25,10	1,7660	2,3540	880	1.050	8.200	7.300
3 × 9	6,27	19,90	2,2270	2,9690	700	840	6.500	5.800
3 × 10	5,59	15,78	2,8080	3,7430	550	660	5.100	4.600

Fonte: MAMEDE FILHO, 2017

## Anexo F – Localização do 1º terreno: Senado Federal



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (GOOGLE, 2018).

## Anexo G – Localização do 2º terreno: Samambaia



Fonte: Adaptado pelo autor obra de (GOOGLE, 2018).

## Anexo H – Orçamento para materiais que compõe o arranjo A



Montal Instalações Indústria e Comércio Ltda.  
CNPJ: 21.335.245/0001-40 IE: 0622905780095  
Rua Castelo de Sintra, 98 - Bairro Castelo  
Belo Horizonte - MG CEP: 31330-310  
Tel: (31) 3476-7675  
E-MAIL: vendas@montal.com.br

### MONTAL INSTALACOES INDUSTRIA E COMERCIO LTDA

RUA CASTELO DE SINTRA, 98 - CASTELO - BELO HORIZONTE/MG - CEP: 31330200

CNPJ: 21.335.245/0001-40 - Insc. Estadual: 0622905780095

Tel.: (31) 3476-7675

**Orçamento: 33397**

Situação: Apenas Orçando

Data: 08/11/18 Hora: 07:30:54

<b>Cliente</b>	<b>Endereço de Entrega</b>
CONSUMO NÃO CONTRIBUINTE FORA DO ESTADO	NONONONO 1 - iiiii
NONONONO, 1 - iiiii	PORTO ALEGRE / RS
CEP: 11.111-111	CEP: 11.111-111
CNPJ/CPF: 00.000.000/0000-00	Telefone: 0 11111111
Ins. Est: ISENTA	Fax: 0 11111111
Telefone: 0 11111111	
Fax:	
Contribuinte: N	Email:
Suframa:	

<b>Endereço de Cobrança</b>	<b>Transportadora</b>
NONONONO 1 - iiiii	
PORTO ALEGRE / RS	
CEP: 11.111-111	-
Telefone: 0 11111111	Telefone:
Fax: 0 11111111	

Item	Referência	Especificação	NCM	UN	Quant	Preço Unit.	Valor total	Pend	ICMS	% IPI	V.IPI	%ST	V.ST
1	MON-0704	HASTE TERRA AC 254MC 5/8 X 3,0M	7326.90.90	PC	40	81,10	3.244,00	*	12	0,00	0,00	0,00	0,00
2	MON-0204	CABO DE COBRE NU 50MM	7413.00.00	MT	275	32,30	8.882,50	*	12	0,00	0,00	0,00	0,00
3	GT-5/8.50-C4	MOLDE HT CB TOPO 5/8.50 P90	6903.10.19	PC	27	75,24	2.031,48	*	12	8,00	162,51	0,00	0,00
4	XA-50.50-C	MOLDE CB PLANO X 50.50 P90	6903.10.19	PC	55	70,23	3.862,65	*	12	8,00	309,01	0,00	0,00
5	MON-0752	COMPOSTO TERRA GEL 12KG	2508.10.00	SC	40	22,22	888,80	*	12	0,00	0,00	0,00	0,00

<b>Condições Comerciais</b>	<b>Valor Inicial:</b>	18.909,43
<b>TPO:</b> Venda para Não Contribuinte Fo	<b>Desconto:</b>	0,00
<b>Vendedor:</b> MONICA	<b>Valor Listado:</b>	18.909,43
<b>Prazo de Pagamento:</b> .A VISTA	<b>Valor Frete:</b>	0,00
<b>Forma de Pagamento:</b> Depósito em Conta	<b>Valor IPI:</b>	471,52
<b>Frete:</b> Frete por conta do Destinatário	<b>Valor S.Trib:</b>	0,00
<b>Peso:</b> 862,160	<b>Valor Seguro:</b>	0,00
<b>Pedido do Cliente:</b>	<b>Total a Pagar:</b>	19.380,95
<b>Previsão de Entrega:</b> 02/01/2020		

DESCONTO JÁ APLICADO DIRETAMENTE NO PREÇO UNITÁRIO DOS PRODUTOS

Fonte: MONTAL, 2018.

## Anexo I – Orçamento máquina perfuratriz



### ORÇAMENTO

Brasília 03 de DEZ de 2018

A/C: LUIDI

Conforme solicitado, segue abaixo nosso orçamento para o fornecimento, por locação, do seguinte equipamento:

EQUIPAMENTO	DIARIA	SEMANA	Quinzena	Mensal
PERFURATRIZ HILT COM BROCA 50MM	R\$700,00	R\$1.500,00	R\$2,0000	R\$2.200,00
FRETE DE ENTREGA E RETIRADA	R\$ 50,00			
<b>TOTAL</b>				

Sem mais, atenciosamente.

MARCOS PAZ – Gerente Comercial  
(61) 3357-1000

**FC Brasília Aluguel de Equipamentos e Comercio de Maquinas LTDA.**

**CNPJ 15.245.835/0003-40**  
**IE: 07602218003-69**

Fonte: FC, 2018.



## Anexo J – Orçamento para materiais que compõe o arranjo B



MONTAL Instalações Indústria e Comércio Ltda.  
CNPJ: 21.335.245/0001-40 E: 0622905780095  
Rua Castelo de Sintra, 98 - Bairro Castelo  
Belo Horizonte - MG CEP: 31330-310  
Tel: (31) 3476-7675  
E-mail: vendas@montal.com.br

### MONTAL INSTALACOES INDUSTRIA E COMERCIO LTDA

RUA CASTELO DE SINTRA, 98 - CASTELO - BELO HORIZONTE/MG - CEP: 31330200

CNPJ: 21.335.245/0001-40 - Insc. Estadual: 0622905780095

Tel.: (31) 3476-7675

**Orçamento: 33398**

Situação: Apenas Orçando

Data: 08/11/18 Hora: 07:29:58

<b>Cliente</b>	<b>Endereço de Entrega</b>
CONSUMO NÃO CONTRIBUINTE FORA DO ESTADO	NONONONO 1 - iiiii
NONONONO, 1 - iiiii	PORTO ALEGRE / RS
PORTO ALEGRE / RS	CEP: 11.111-111
CNPJ/CPF: 00.000.000/0000-00	Telefone: 0 111111111
Ins. Est: ISENTO	Fax: 0 111111111
Telefone: 0 111111111	
Contribuinte: N	Suframa:
	Email:

<b>Endereço de Cobrança</b>	<b>Transportadora</b>
NONONONO 1 - iiiii	
PORTO ALEGRE / RS	
CEP: 11.111-111	-
Telefone: 0 111111111	Telefone:
Fax: 0 111111111	

Item	Referência	Especificação	NCM	UN	Quant	Preço Unit.	Valor total	Pend	ICMS	% IPI	V.IPI	%ST	V.ST
1	MON-0708	HASTE TERRA AC 254MC 3,4 X 3,0M	7326.90.90	PC	121	113,07	13.681,47	*	12	0,00	0,00	0,00	0,00
2	MON-0205	CABO DE COBRE NU 70MM	8535.40.90	MT	275	50,75	13.956,25	*	12	0,00	0,00	0,00	0,00
3	GT-5/8.70-C4	MOLDE HT CB TOPO 5/8.70 P115	6903.10.19	PC	21	75,24	1.580,04	*	12	8,00	126,40	0,00	0,00
4	XA-70.70-C	MOLDE CB PLANO X 70.70 P115	6903.10.19	PC	55	70,23	3.862,65	*	12	8,00	309,01	0,00	0,00
5	MON-0752	COMPOSTO TERRA GEL 12KG	2508.10.00	SC	121	22,22	2.688,62	*	12	0,00	0,00	0,00	0,00

<b>Condições Comerciais</b>	<b>Valor Inicial:</b>	35.769,03
<b>TPO:</b> Venda para Não Contribuinte Fo	<b>Desconto:</b>	0,00
<b>Vendedor:</b> MONICA	<b>Valor Listado:</b>	35.769,03
<b>Email:</b> vendas4@montal.com.br	<b>Valor Frete:</b>	0,00
<b>Prazo de Pagamento:</b> .A VISTA	<b>Valor IPI:</b>	435,41
<b>Forma de Pagamento:</b> Depósito em Conta	<b>Valor S.Trib:</b>	0,00
<b>Frete:</b> Frete por conta do Destinatário	<b>Valor Seguro:</b>	0,00
<b>Peso:</b> 2.282,775	<b>Total a Pagar:</b>	36.204,44
<b>Pedido do Cliente:</b>		
<b>Previsão de Entrega:</b> 12/11/2018		

DESCONTO JÁ APLICADO DIRETAMENTE NO PREÇO UNITÁRIO DOS PRODUTOS

Fonte: MONTAL, 2018.